POLITECNICO DI MILANO
Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale
Corso di Laurea di 2° Livello in Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio

Anno Accademico 2011–2012

EDILIZIA A BASSO IMPATTO AMBIENTALE: ANALISI DEL CICLO DI VITA DI MATERIALI NATURALI A BASE DI CALCE-CANAPULO

Relatore: Prof. Giovanni Dotelli

Correlatore: Ing. Gianluca Ruggieri

Tesi di laurea di:

Cristian Colombo n°736101

Ottavio Ruggieri n°766132

INDICE

CAP. 5 LCA DEI PRODOTTI IN CALCE E CANAPULO 128

ABSTRACT

La forte dipendenza dai combustibili fossili e le conseguenti emissioni di gas serra (in particolare CO_2 e metano) hanno spinto tutti i settori industriali ad adottare una nuova politica finalizzata al raggiungimento di obiettivi di miglioramento ambientale, economico, sociale ed istituzionale facendo nascere così il concetto di sviluppo sostenibile ovvero un processo che lega la tutela e la valorizzazione delle risorse naturali alla dimensione economica e sociale: tutto questo al fine di soddisfare i bisogni delle attuali generazioni, evitando così di compromettere la capacità delle future di soddisfare i propri. In questo contesto l'utilizzo di risorse "verdi" è uno strumento che attua questo nuovo modo di pensare sostenibile nel migliore dei modi e ne rappresenta il punto d'inizio. La nostra tesi ha lo scopo di quantificare gli impatti ambientali di questi nuovi materiali naturali ed elencare i vantaggi che si possono ottenere con il loro impiego mediante l'analisi del ciclo di vita (LCA). Il materiale studiato è una miscela tra canapa e calce. Nello specifico il prodotto in canapa che rappresenta il materiale riempitivo, prende nome di canapulo ed è ottenuto dalla stigliatura della canapa, mentre la calce funge da legante e conservante. Questo composto viene impiegato in edilizia ed utilizzato sia come isolante termico che acustico e date le proprietà "ecologiche" della canapa contribuisce positivamente al risparmio energetico e all'impatto ambientale dell'edificio.

Gli obiettivi del seguente lavoro sono:

- quantificare gli impatti ambientali più importanti associati alla produzione di materiali di isolamento termico in calce-canapulo, con particolare attenzione ai prodotti proposti dall'azienda Equilibrium;
- confrontare, dal punto di vista degli impatti, i materiali di isolamento termico in calce-canapulo con soluzioni tradizionali.

La tesi è strutturata in una introduzione e 6 capitoli:

Un'introduzione sul contesto energetico mondiale, gli obiettivi e gli strumenti adottati, e l'importanza che assume il risparmio energetico edilizio.

Nel capitolo 1 si vuole fornire un inquadramento generale sul concetto di bioediliziaa a basso impatto ambientale e architettura sostenibile, sottolineando il peso di questa nuova disciplina e fornendo un'inquadratura generale sulle possibili tecniche e tecnologie applicabili.

Nel capitolo 2 viene fatta un'introduzione teorica alla procedura di LCA con relativa valutazione degli impatti e possibili indicatori utilizzabili; viene approfondita l'applicazione della procedura

LCA in edilizia e infine viene presentato il software Simapro, utilizzato per il calcolo degli impatti e analisi dei diversi indicatori da utilizzare.

Nel capitolo 3 vengono forniti i concetti di isolamento termico in edilizia, di risparmio energetico e una panoramica sui possibili materiali, naturali e non ,utilizzabili per isolare un edificio.

Nel capitolo 4 vengono illustrati i materiali di isolamento termico proposti dall’azienda Equilibrium, che si distinguono in biomattone e Natural Beton (miscela di calce e canapulo); vengono inoltre proposte le principali applicazioni dei suddetti prodotti.

Nel capitolo 5 viene affrontata l’analisi del ciclo di vita dei tre prodotti in calce e canapa. Nella prima parte vengono elencati gli scopi e gli obiettivi, l’unità funzionale e l’analisi d’inventario. Nella seconda parte vengono valutati, attraverso l’uso di alcuni indicatori, gli impatti ambientali associati al ciclo di produzione.

Nel capitolo 6 infine viene effettuato il confronto tra gli impatti ambientali generati dall’utilizzo di diversi materiali isolanti per sei pareti differenti. Inoltre viene quantificato il tempo in cui gli impatti ambientali, associati all’utilizzo di un maggiore quantità di isolante, vengono riassorbiti dai minori impatti legati al miglioramento delle prestazioni energetiche delle pareti stesse.

INTRODUZIONE

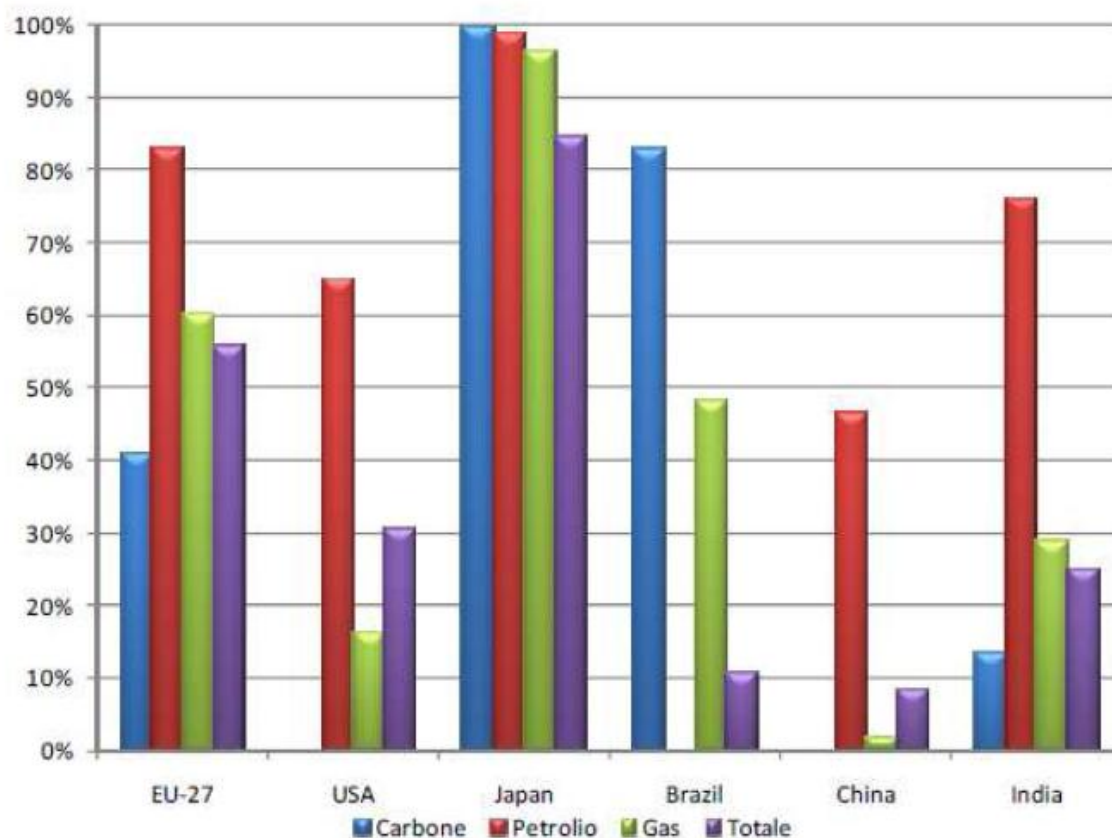
La rivoluzione industriale ha trasformato completamente il modo di utilizzare l'energia da parte dell'uomo; l'estrazione su vasta scala di combustibili ad alta densità di energia e a basso costo, come il petrolio e successivamente il gas, ha permesso l'accesso a un enorme quantità di energia potenziale ad appannaggio però di una minoranza della popolazione mondiale. L'economia mondiale è oggi alimentata fondamentalmente da combustibili fossili, secondo stime del 2006, antecedenti quindi alla crisi economica del biennio 2008-2009, fatte dall'agenzia americana EIA (United States Department of Energy), i 15 TW stimati come potenza totale erogata nel 2004 si dividono come indica la tabella sottostante, con i combustibili fossili che forniscono 86% dell'energia consumata dal mondo.

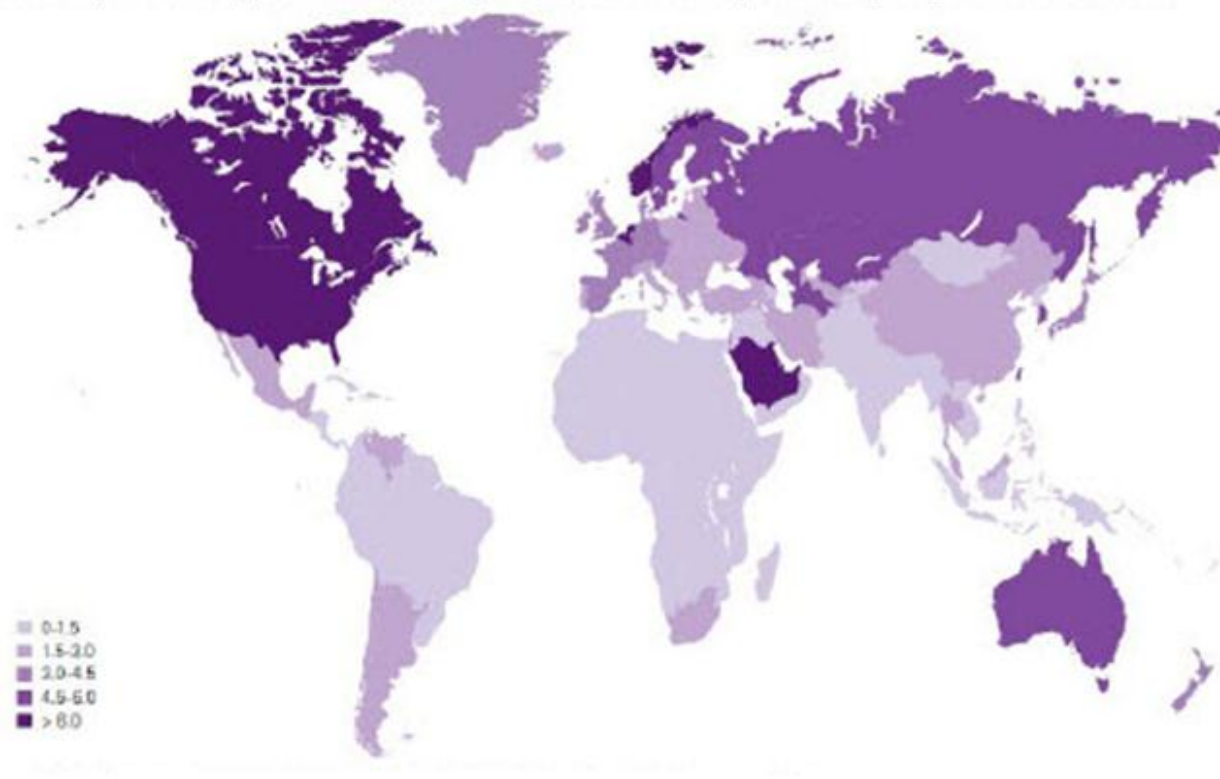
Tipo di combustibile	**Potenza in TW**	**Energia/anno in EJ**
Petrolio	5,6	180
Gas naturale	3,5	110
Carbone	3,8	120
Idroelettrico	0,9	30
Nucleare	0,9	30
Geotermia, eolico, solare, legno	0,13	4
Totale	**15**	**471**

Secondo l'ultima edizione del WEO, il 2009 ha visto una diminuzione della domanda di energia primaria, causata dalla crisi economica, e i mercati energetici si sono modificati in maniera consistente. La crisi si è riflettuta in una riduzione della domanda di energia dai settori industriale e domestico, prezzi più bassi, e un rallentamento negli investimenti. Il WEO 2009 indica come la caduta della domanda di energia primaria sia stata particolarmente rilevante nei Paesi OCSE. Negli USA la domanda di energia primaria nei primi sei mesi del 2009 è stata del 6% minore rispetto all'anno precedente, con una diminuzione del consumo di petrolio dell'8%. Anche in Europa si è osservata una diminuzione nella prima metà del 2009.

Il petrolio comunque rimane al primo posto come contributo al soddisfacimento della domanda di energia primaria mondiale, con una quota pari al 33% nel 2008 (Renewable Energy Information 2010). L'Oil Market Report indica che la domanda mondiale di petrolio è scesa del 3,3% e del 2,7%

nei primi due trimestri del 2009 (rispetto all'anno precedente), per poi mostrare una diminuzione più lieve nel terzo trimestre (-0,6%) e una ripresa nell'ultimo trimestre (0,8%). Gli investimenti nel settore upstream per petrolio e gas sono stati tagliati del 19% rispetto al 2008, una riduzione pari a 90 miliardi di dollari, e un analogo impatto può essere osservato per gli investimenti nel settore elettrico (World Energy Outlook 2009). Il carbone rimane, dopo il petrolio, il combustibile più importante nella domanda di energia primaria mondiale, con una quota pari al 27% nel 2008. La quota dei Paesi OCSE nella domanda mondiale di carbone è diminuita in modo consistente dal 1980 al 2008, dal 54% al 34%. Nel 2009 le prime stime sugli investimenti nel settore del carbone indicano un forte calo rispetto ai livelli particolarmente elevati raggiunti nel 2007-2008 (World Energy Outlook 2009). Il gas ha una quota pari al 21% nella domanda di energia primaria mondiale. Nonostante il 2009 sia stato l'inverno più freddo degli ultimi 20 anni, il World Energy Outlook 2009 indica una diminuzione della domanda di gas in Europa, del 9% rispetto all'anno precedente, in particolare in Italia, Spagna e Regno Unito (rispettivamente -14%, -13% e -11%). Il nucleare, infine, contribuisce per il 6% al soddisfacimento della domanda di energia primaria mondiale. Le fonti di energia rinnovabile (FER), invece, sono cresciute dal 1990 ad oggi ad un tasso medio annuo (1,9%) pari a quello dell'offerta mondiale di energia primaria alla quale hanno contribuito nel 2008 per una quota pari al 12,8% del totale, essenzialmente attraverso la biomassa solida (9,1%). L'apporto delle rinnovabili alla produzione elettrica mondiale nel 2008 corrisponde invece al 18,5% del totale di cui la gran parte proveniente dall'idroelettrico (15,9%). In UE i consumi di energia primaria da FER nel 2008 sono arrivati a quota 8,2% del totale con la biomassa solida che anche in questo caso è la fonte principale (66,1% totale FER), mentre nel settore elettrico le rinnovabili incidono per una quota pari al 16,4% del consumo lordo, soprattutto grazie all'idroelettrico (59,5%). Il 2008 e il 2009 sono stati due anni che hanno segnato un fatto molto importante per le rinnovabili, per due anni consecutivi la nuova capacità installata da FER è stata superiore al 50% del totale delle nuove installazioni in UE superando quindi quella delle fonti tradizionali. Nel 2009 questa quota è stata del 61% aumentando dal 14% nel 1995. Un'ulteriore analisi dell'offerta di energia primaria (TPES) dagli ultimi bilanci IEA disponibili indica che il petrolio costituisce la fonte di maggiore importanza in Giappone, USA e Unione Europea (rispettivamente il 45%, 39% e 35% della TPES), mentre in Cina e India tale ruolo è ricoperto dal carbone (66% e 41%). Per l'Unione Europea il gas è il secondo combustibile di maggiore importanza (25%), seguito dal carbone (19%). Negli USA petrolio e gas hanno praticamente pari importanza (24%). Mentre il petrolio svolge un ruolo rilevante nella TPES della Cina (18%), la quota del gas rimane trascurabile (3%). Tali dati, mostrati nel grafico sottostante, sono da analizzare parallelamente a quelli sulla dipendenza energetica: metà del petrolio consumato in Cina nel 2007 è importato, più della metà in

USA e India e la quasi totalità nell’Unione Europea. Il Giappone ha un’elevatissima dipendenza energetica per tutte le materie prime energetiche (Rapporto Enea 2009).

DIPENDENZA ENERGETICA NEL 2007 (FONTE: ENEA, 2009)

Inoltre, come appare nella figura sottostante, la domanda energetica mondiale si presenta geograficamente molto difforme, rispetto al peso demografico di ciascuna area, e ciò rappresenta un primo elemento di criticità per il futuro. Secondo quanto riportato dall’International Energy Agency, degli 11.741 Mtep di energia utilizzati nel mondo nel 2006, oltre 5.537 sono andati ai 1.175 milioni di abitanti dell’area OCSE e appena 1.897 ai 1.321 milioni di abitanti della Cina. È evidente come tale squilibrio, in futuro, sia destinato a ridursi per la crescita dell’economia e delle aspirazioni di larga parte della popolazione mondiale verso un più elevato standard di vita.

CONSUMI ENERGETICI PRO CAPITE (FONTE: BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2011)

In aggiunta a tutto questo la crescente dipendenza dai combustibili fossili continuerebbe a sostenere non solo le emissioni di CO_2 ma anche i prezzi degli stessi combustibili. In particolare è previsto un aumento della domanda di carbone e, dato anche il lungo ciclo di vita delle centrali a carbone, il sistema energetico internazionale risulterebbe vincolato su uno sviluppo ad alta intensità di carbonio. Anche la domanda di gas e petrolio dovrebbe aumentare, e se i Paesi dell'Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC) e la Russia non realizzeranno consistenti investimenti, i prezzi di petrolio e gas sono destinati ad avere un trend crescente. La crescente dipendenza dai combustibili fossili contribuirà anche a rendere i Paesi importatori di petrolio e gas naturale sempre più dipendenti da importazioni di combustibili provenienti da un ristretto numero di Paesi, aumentando il livello di rischio energetico e la stabilità della crescita economica (Rapporto Enea 2009). Continuando con lo scenario di crescita dei consumi degli ultimi 30 anni, prima del 2050 tutte le risorse energetiche non rinnovabili attualmente accertate saranno esaurite. In questo contesto energetico, si è aggiunta anche una crescente preoccupazione per la salute del pianeta: il cambiamento climatico. Esso rappresenta un'esternalità ambientale di natura globale: tutti i Paesi,

seppur in misura diversa, hanno prodotto e continuano a produrre emissioni di gas serra, e l'aumento delle concentrazioni di questi gas è tale da produrre effetti di variazione del clima (IPCC, 2007). Tutto questo ha portato alla luce una serie di eventi a livello mondiale nelle quali si è discusso sia della presente situazione ambientale sia di quella a cui si sarebbe arrivati. Di notevole importanza sono state le Conferenze Mondiali sull'Ambiente e sul clima, come l'Earth Summit di Rio de Janeiro del 1992, che coinvolse 172 governi e 108 capi di Stato e 2.400 rappresentanti di organizzazioni non governative. In questa conferenza gli argomenti principali furono la volontà di limitare la produzione di tossine come piombo nel gasolio, l'incentivazione all'utilizzo di energia derivata da fonti rinnovabili per rimpiazzare l'abuso di combustibile fossile ritenuto responsabile del cambiamento climatico globale, un quadro sui sistemi del trasporto pubblico con la finalità di ridurre le emissioni dei veicoli, la congestione nelle grandi città e i problemi di salute legati allo smog ed infine venne affrontato il problema crescente della scarsità dell'acqua. L'accordo sulla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC United Nation Framework Convention on Climate Change) fu il primo passo verso un nuovo modo di pensare "sostenibile"; il trattato prevedeva dei protocolli che avrebbero posto limiti obbligatori di emissioni; da qui il più famoso è quello di Kyoto che prevede l'impegno dei Paesi Industrializzati a ridurre le emissioni di alcuni gas ad effetto serra, responsabili del riscaldamento globale. Per il contenimento entro livelli gestibili, con apposite misure di adattamento dei danni peggiori derivanti dal cambiamento climatico, secondo il IV Rapporto dell'IPCC, sarebbe necessario che le emissioni di gas serra, prodotte dalle attività umane, venissero ridotte di almeno l'80% entro il 2050. L'Unione Europea si è data come tappa intermedia, il raggiungimento entro il 2020 di una riduzione delle emissioni di gas serra del 20%, portato al 30% in caso di accordo internazionale. Si è prefissata, al contempo, come obiettivi strategici di accompagnamento, la riduzione dei consumi energetici del 20% (rispetto al 2005), attraverso il miglioramento dell'efficienza e una quota di produzione da fonti rinnovabili del 20%. Si ritiene che, per raggiungere l'obiettivo del 2050, si debba decisamente puntare ad una riduzione delle emissioni di gas-serra almeno del 30% entro il 2020. Per uscire dal percorso energetico attuale è necessario percorrere strade alternative rispetto a quella sin qui seguita basata sulla crescita illimitata dei consumi in un pianeta con evidenti limiti biofisici. È necessario correggere il sistema produttivo e gli stili di vita delle società umane al fine di ottenere il massimo benessere possibile con le risorse a disposizione, operando quindi con concrete azioni basate sull'efficienza, la sufficienza e l'efficacia dei modelli di produzione e consumo, in altre parole orientarsi verso il concetto di sostenibilità ambientale, economica e sociale. Il primo obiettivo è stabilizzare i consumi, operando sull'efficienza non solo degli usi finali, ma anche dell'intero tessuto economico e produttivo, ridefinendone coerentemente obiettivi, strategie e strumenti. Il

secondo obiettivo è ridurre i consumi all'interno di uno schema energetico che deve essere dotato di elevata resilienza, ovvero capace di adattarsi in tempo reale alle variazioni del contesto economico e sociale nazionale e internazionale. Ciò porterebbe alla riduzione del 20% dei consumi al 2020, in linea con gli impegni europei, e del 50% al 2030. Le fonti rinnovabili dovrebbero triplicare rispetto a oggi entro il 2020, coprendo circa il 30% dei consumi, e crescere di un altro 25% fino a soddisfare il 50% della domanda di energia nel 2030. Il ricorso alle fonti fossili, ridotto rispetto a oggi del 50%, andrebbe a coprire il restante 50% dei consumi del 2030. La transizione dall'uso dei combustibili fossili a quello dell'energia solare e delle altre energie rinnovabili richiederà però molto tempo per motivi tecnici, sociali, economici e politici. In questo lungo periodo di transizione è necessario limitare i danni che l'uso dei combustibili fossili causa all'ambiente e, in particolare, al clima del nostro pianeta. È necessario, quindi, ridurre drasticamente gli sprechi e aumentare l'efficienza nell'uso dell'energia e delle altre risorse non rinnovabili. In un contesto mondiale in cui l'ambiente assume un ruolo di fondamentale importanza, l'efficienza energetica rappresenta uno strumento potente ed efficace per raggiungere un futuro energetico sostenibile; è il risultato di un percorso fatto di progresso scientifico, di corretta informazione, di innovazione tecnologica e di comportamenti razionali di utilizzo dell'energia. Essa è di fatto il rapporto tra quanto ottenuto in termini di prodotti e servizi e l'energia impiegata allo scopo. Una maggior efficienza energetica, e di conseguenza un risparmio energetico, verranno ottenuti sia mediante l'utilizzo di nuove tecnologie sia mediante un comportamento maggiormente consapevole e responsabile degli utenti. L'attenzione e l'interesse nei confronti dell'ambiente risultano quindi quanto mai crescenti, a seguito della presa di coscienza delle ripercussioni dell'inquinamento sulla salute umana e delle implicazioni conflittuali di tipo geopolitico derivanti dalla finitezza delle risorse materiali ed energetiche a disposizione sul nostro pianeta (Paolo Neri et al, 2008). Gli edifici sono uno dei più importanti consumatori di energia, che rappresentano circa il 40% del consumo lordo di energia in Europa. Pertanto, nel settore delle costruzioni in Europa, possono essere raggiunti sorprendenti risultati. L'attuale consumo medio per il riscaldamento di ambienti del parco edifici europeo si attesta tra 150 e 230 kWh/m^2 anno, d'altra parte, per i nuovi edifici, non è più un evento eccezionale progettare un'abitazione che richiede tra 15 e 30 kWh/m^2 anno. Ridurre il consumo energetico di un fattore 10 non è un'utopia, e la Direttiva europea sul rendimento energetico nell'edilizia (EPBD) è un passo concreto in questa direzione. La direttiva EPBD fornisce un quadro generale per il calcolo del rendimento energetico integrato di edifici e stabilisce i requisiti concernenti la certificazione energetica di edifici. Inoltre, più recentemente, c'è stato un interesse sempre maggiore sulla sostenibilità complessiva degli edifici, non solo concentrandosi sul consumo di risorse non rinnovabili durante la vita operativa, ma anche tenendo conto del consumo globale di

energia tra energia incorporata e la performance economica generale nel corso l'intero ciclo di vita dell'edificio (Niccolò Aste et al, 2008). La riduzione della domanda di energia primaria, la lotta contro i cambiamenti climatici e la diminuzione delle emissioni inquinanti sono, infatti, obiettivi simultaneamente raggiungibili soltanto attraverso una maggiore efficienza energetica a livello globale, che rappresenta l'unico sistema in grado di attenuare i problemi energetici senza creare ostilità fra nazioni e contrasti fra gli obiettivi politici (Trevisi et al, 2007).

CAP. 1 EDILIZIA A BASSO IMPATTO ENERGETICO

1.1 L’ importanza dell’edilizia nel settore ambientale ed energetico

Nel panorama complessivo, il settore civile (residenziale più terziario) è fortemente coinvolto nel consumo energetico, con un contributo medio relativo alle fonti energetiche tradizionali che si attesta, mediamente in Europa, intorno al 40%. Gli Stati Uniti, l’Europa e la Russia consumano la maggior parte della loro energia nel settore dell'edilizia (circa 40%) (Figura 1) (IEA, 2008), inoltre nell’edilizia è presente oltre il 50% del risparmio potenziale di energia e pertanto esso è considerato come un settore che potrebbe essere in grado di far fronte alle sfide globali per il consumo dell’energia e per quello che riguarda i cambiamenti del clima. A causa di un alto consumo energetico nella produzione industriale in Cina, il settore edile, in questo paese, rappresenta solo il 19% della domanda energetica, ma la quota in Cina crescerà rapidamente con il suo sviluppo economico e con l'urbanizzazione. Il settore delle costruzioni, dunque, è un driver importante dell'economia mondiale. Ad esempio, ha un contribuito del 9% del PIL nella Cina e nell'UE. Secondo un rapporto da McGraw Hill Construction, nel mercato delle costruzioni “verdi”, sia nel settore residenziale sia in quello non residenziale, è stato previsto un aumento in un range che va da 96 a 140 miliardi di dollari dal 2013. Vi è dunque una significativa opportunità per coloro che entrano in questo mercato (McGraw-Hill Costruzione, 2008).
Il settore civile è, quindi, il primo settore per quanto riguarda i consumi energetici e risulta avere un peso maggiore rispetto ai consumi generati dal settore industriale e da quello dei trasporti. I 193 milioni di edifici dell’UE-25 causano, a livello globale, il 50% circa delle emissioni di SO_2, il 22% di NOx, circa il 10% di emissioni di particolato, e, più in generale, un terzo delle emissioni totali di gas serra (GHG). Di queste, due terzi sono causate da edifici di tipo residenziale, mentre la restante parte da quelli di tipo commerciale (Balaras et al., 2005). Queste emissioni sono principalmente collegate alla fase di utilizzo degli edifici, mentre le emissioni relative alle fasi di produzione dei materiali da costruzione sono attribuite al settore industriale e in Europa Occidentale, ad esempio, risultano pari all’8-12%, a cui poi possono essere aggiunti i contributi relativi ai trasporti e ad altre attività legate alla costruzione (Nässén et al., 2007; Althaus et al., 2005). Tra il 1990 e il 2000 la

costruzione di nuovi edifici ha conosciuto un aumento annuo dello 0,89% nei Paesi della UE-25, mentre la crescita della richiesta di energia è stata limitata allo 0,4%; questo è stato reso possibile dalle tecnologie e dai materiali via via più efficienti che vengono introdotti nel mercato edilizio e dal fatto che non tutti i nuovi edifici sono occupati permanentemente.

Nel periodo 2000-2030 ci si aspetta un incremento annuo dei consumi dello 0,6%, principalmente dovuto all'incremento delle abitazioni e degli interventi di ammodernamento delle stesse, piuttosto che ad un effettivo aumento demografico. L'aumento dei consumi seguirà un andamento più rapido nei Paesi ad economia e tecnologie sviluppate piuttosto che in quelli a medio e basso sviluppo. Nonostante negli ultimi anni l'innovazione tecnologica stia migliorando, le prestazioni energetiche di molti strumenti, dispositivi elettronici, etc., e l'estendersi ad una maggiore fascia della popolazione di molte tecnologie che fino a poco tempo fa erano considerate "di lusso", fa sì che tuttora non si possa godere dei benefici delle riduzioni di consumo assunte in precedenza (Balaras et al., 2005). In Italia, ad esempio, si è osservato che, negli ultimi anni, il consumo elettrico estivo degli edifici italiani ha iniziato a superare quello invernale. Ciò avviene per il combinato effetto del più alto livello di confort richiesto dagli utenti e delle più frequenti oscillazioni stagionali delle temperature dovute al cambiamento climatico (Aste et al., 2010).

Uno dei punti cardine della strategia dello sviluppo sostenibile è la minimizzazione del consumo energetico durante la produzione dei materiali edilizi, la costruzione degli edifici e il loro ciclo di vita. In base all'analisi dei fattori nocivi per l'ambiente, risulta che la maggior parte di essi (effetto serra, acidificazione, tossicità, etc.) deriva dalla combustione dei combustibili fossili. L'effetto serra prevale durante la fase d'uso dell'edificio, mentre gli altri (in particolare la tossicità) durante la fase di produzione (Sobotka & Rolak, 2009).

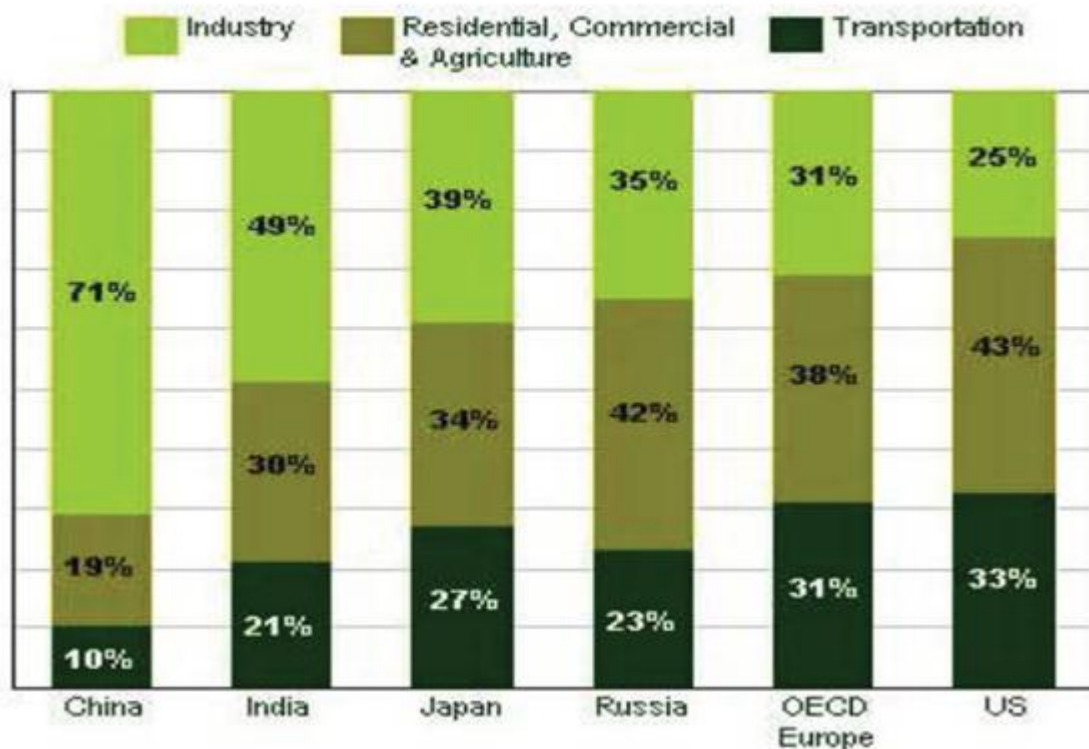



FIG-1 GLOBAL ENERGY DEMAND BY SECTOR IN 2005 (SOURCE: IEA, 2008)

Inoltre è da notare che il riscaldamento degli edifici e il raffreddamento sono le maggiori attività che hanno un elevato utilizzo di energia, seguiti dal consumo di energia elettrica per l'illuminazione e dall'uso degli elettrodomestici (F.Zhang & P.Cooke, 2010). In particolare, gli anni Novanta hanno visto impennare la domanda legata al condizionamento (aumento del 14,6%) come risultato di un diffondersi delle esigenze di comfort ad una sempre più vasta fascia di popolazione. Ricollegandoci a quanto detto in precedenza, poiché il settore civile risulta essere il primo settore per quanto riguarda i consumi energetici rispetto agli altri, le emissioni di gas serra dovute all'uso di energia per gli edifici sono significativamente superiori a quelli dovuti al settore dei trasporti. La crescente domanda di spazi per l'edilizia residenziale e commerciale nei paesi in via di sviluppo spinge ulteriormente questo consumo. È stato predetto da International Panel on Climate Change (IPCC) che le emissioni di CO_2 degli edifici (anche attraverso l'uso di energia elettrica) potrebbe aumentare da 8,6 miliardi di tonnellate nel 2004 a 15,6 tonnellate di CO_2 nel 2030 in uno scenario di forte crescita (Figura 2) (Levine et al., 2007). I paesi in via di sviluppo inoltre contribuiranno con sostanziali aumenti di CO_2 nel settore edilizio. Ma un tale boom edilizio offre anche l'opportunità di commercializzare efficienti tecnologie per ridurre le emissioni di CO_2.

Note: Dark red – historic emissions; light red – projections 2001–2030 data; 2000–2010 data adjusted to actual 2000 carbon dioxide emissions. EECCA = Countries of Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia. Source: Levine et al., 2007.

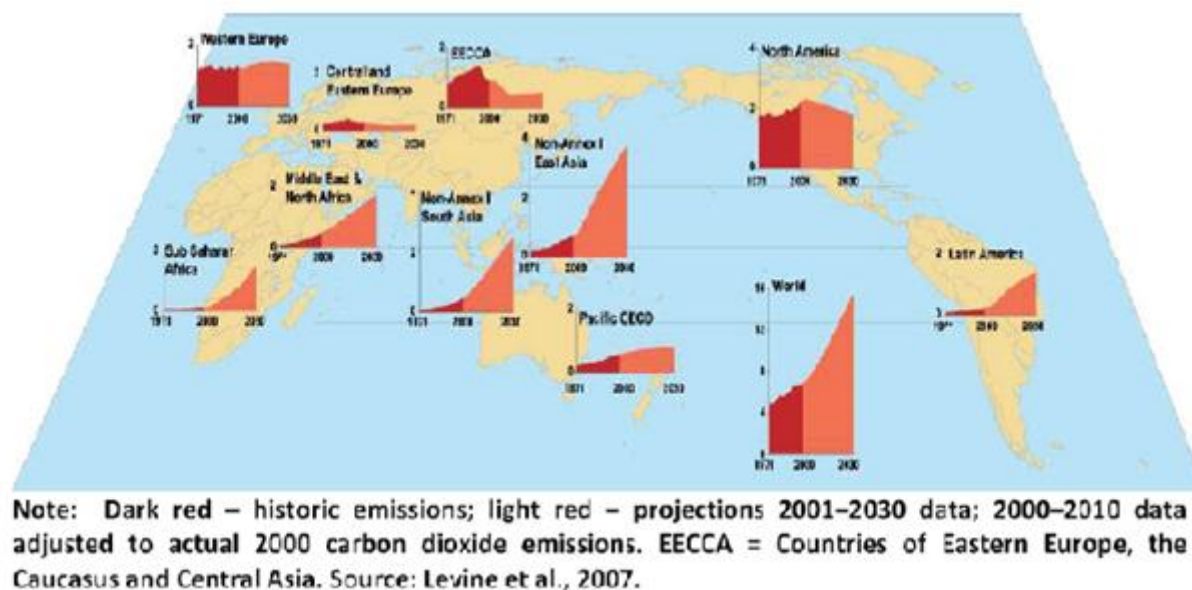



FIG-2 CO_2 EMISSIONS FROM BUILDING SECTOR UNDER HIGH GROWTH SCENARIO (INCLUDING THE USE OF ELECTRICITY). (SOURCE: LEVINE ET AL., 2007)

Recentemente un notevole sforzo applicativo è stato fatto per i materiali rinnovabili e le risorse energetiche rinnovabili utilizzati nell’edilizia al fine di utilizzare l'energia in modo efficiente e riducendo così l'impronta di carbonio. Per esempio l'energia utilizzata per il riscaldamento e il raffreddamento può essere ridotta attraverso la ventilazione, i dissipatori di calore, l'uso del pannello solare e un buon sistema di isolamento. L'elettricità può essere ridotta attraverso una migliore illuminazione a LED o incremento dell’uso dell’illuminazione naturale e con l'utilizzo di elettrodomestici ad alta efficienza energetica. E' stato calcolato che rispettando queste applicazioni per quanto riguarda la bioedilizia gli edifici possono ridurre le emissioni di gas serra fino al 70-80% (WBCSD, 2009).

1.2 Bioedilizia e architettura sostenibile

Lo stato di degrado ambientale generato dal nostro sistema di sviluppo ha raggiunto livelli di assoluta emergenza e pone l’uomo di fronte all’obbligo di riesaminare il rapporto tra lo sfruttamento delle risorse e la qualità del’habitat. E’un dato allarmante, ma acquisito, che in una sola generazione abbiamo consumato più risorse non rinnovabili di quanto non abbia fatto l’intera umanità nei secoli precedenti, creando così una crisi del sistema non più settoriale ma globale (Graziano Trippa et al., 1998). L’industria delle costruzioni ha un’evidente responsabilità a causa dell'altissimo consumo energetico, delle sue emissioni nell'atmosfera, dell'inarrestabile consumo del territorio e del diffuso

utilizzo di materiali di origine petrolchimica che determinano gravi problemi di inquinamento durante tutto il loro ciclo di vita. L'efficientismo tecnologico ha reso possibile le condizioni di benessere e di comfort in edifici, morfologicamente e tecnologicamente simili, ubicabili in qualsiasi realtà geografica, prevedendo però lo sfruttamento di fonti energetiche spesso non rinnovabili. Le problematiche legate ai livelli di inquinamento raggiunti dal suolo, dall'acqua e dall'aria (effetto serra, buco dell'ozono, etc.), hanno incrinato il rapporto positivo creato in secoli di sana convivenza tra l'uomo e il suo contesto. L'architettura e l'urbanistica, nella loro storia si sono sempre confrontate ecologicamente con l'ambiente, al fine di creare condizioni favorevoli di comfort in situazioni geografico-climatiche spesso estreme. L'ottima conoscenza da parte delle popolazioni indigene delle elementari nozioni di meteorologia, delle prestazioni fisico termiche dei materiali facilmente reperibili e lavorabili, l'uso ottimale del suolo e del territorio, hanno influito in materia determinante nel generare le architetture e le città caratteristiche di ogni luogo. Questa architettura "popolare" proprio perché caratterizzata da un uso attento delle risorse e delle tecnologie, è riuscita a ottimizzare un principio fondamentale: quello della massima efficienza con il minimo dispendio di energie. Tal rapporto viene definito "sostenibile" perché caratterizzato da regole di comportamento non distruttive e finalizzate a un sfruttamento controllato delle risorse. Questo patrimonio di conoscenze è stato però progressivamente perso e ignorato. Ciononostante, negli ultimi vent'anni, si è sviluppata una coscienza ecologica che ha portato ad attivare una serie di meccanismi normativi che pongono come requisito essenziale, per le costruzioni e l'ambiente, da una parte l'igiene, la salute e l'ambiente, e dall'altra il risparmio energetico (Graziano Trippa et al., 1998). Perciò fine primario della bioarchitettura è dare all'edilizia un nuovo indirizzo rivolto sia al rispetto delle esigenze dell'uomo che al rispetto dell'ambiente sin dalle prime fasi di progettazione, realizzazione e gestione di un green building; lo scopo secondario invece è quello di aumentare l'efficienza dell'uso delle risorse (tra cui energia, acqua e materiali) e ridurre gli impatti dell'edificio negativi sull'ambiente durante il ciclo di vita dell'edificio. Nella bioedilizia il concetto di edifici ad "Energia Zero" hanno come scopo quello di ridurre il consumo energetico e le emissioni di gas ad effetto serra, riducendo così l'impatto ecologico (F.Zhang & P.Cooke, 2010).

In questo senso la così detta "casa passiva" riesce a raggiungere un impatto zero sull'ambiente, non richiedendo energia per riscaldare gli ambienti, ma attraverso un'attenta progettazione riesce a sfruttare l'energia proveniente dall'esterno (sole) e quella prodotta al suo interno da elettrodomestici e dalle stesse persone che vi abitano, rinunciando così alla presenza di impianti di riscaldamento. Senza raggiungere progetti così sofisticati, la bioarchitettura si può avvalere delle energie rinnovabili per fornire l'energia termica ed elettrica necessaria. Per il riscaldamento si possono utilizzare i pannelli solari termici (o collettori solari), gli impianti a biomassa o la geotermia a bassa

entalpia. Per fornire energia elettrica si possono utilizzare i pannelli fotovoltaici, oppure sfruttare l’energia eolica con impianti di mini o micro eolico o se disponibile un corso d’acqua con caratteristiche adeguate, si può pensare anche ad un impianto mini idroelettrico. Queste tecnologie possono così agire positivamente nel ridurre le emissioni in atmosfera di CO_2 e di altri gas inquinanti. Grazie al loro utilizzo ed una progettazione attenta si può arrivare ad avere edifici energeticamente autosufficienti. Esempi di questo tipo ce ne sono molti nel mondo.
Inoltre anche nel settore dei materiali per la costruzione, la bioedilizia sfrutta prodotti naturali per la realizzazione di strutture, ottenendo perciò edifici realizzati in materiali ecocompatibili.

1.3 Settori di intervento nella progettazione integrata degli edifici

Oggi, è possibile applicare materiali ecologici e tecnologie avanzate nella fase di costruzione dei progetti al fine di consumare meno energia. La progettazione degli edifici “verdi” coinvolge molti professionisti nei vari settori differenti. In tutto questo devono essere presi in considerazione molti aspetti, compreso il clima, la costruzione, i livelli di comfort, i materiali, i sistemi e la salute. Di seguito è mostrata, nella figura 3, le interrelazioni tra quattro principali fattori che collegano l'efficienza energetica al consumo di energia, esse sono: la progettazione (intervento passivo), la costruzione, l’utilizzo di tutte le attrezzature e le infrastrutture (interventi attivi); si ottengono così delle ripercussioni sul fabbisogno energetico per il riscaldamento, la ventilazione e l’utilizzo di aria condizionata (F.Zhang & P.Cooke, 2010). L’edilizia per la progettazione integrata richiede che tutti i partecipanti, tra i proprietari, gli architetti, gli ingegneri e gli altri soggetti vengano coinvolti nella fase iniziale del progetto. Il rendimento energetico della costruzione di un edificio dipende non solo dalle prestazioni di una tecnologia individuale, ma anche dalla sua integrazione con il sistema globale. Per prima cosa occorre intervenire a livello progettuale massimizzando gli apporti gratuiti agendo sulla forma, sull’orientamento dell’edificio e in secondo luogo sulla progettazione dell'involucro. Successivamente va tenuto conto dell’interazione del sistema HVAC (heating, ventilation and air conditioning) con l’illuminazione, mentre il design riunirà tutti gli elementi in materia di efficienza energetica (WBSCD, 2007). Approcci di progettazione integrata potrebbero ridurre il consumo energetico fino al 72% (WBSCD, 2009).

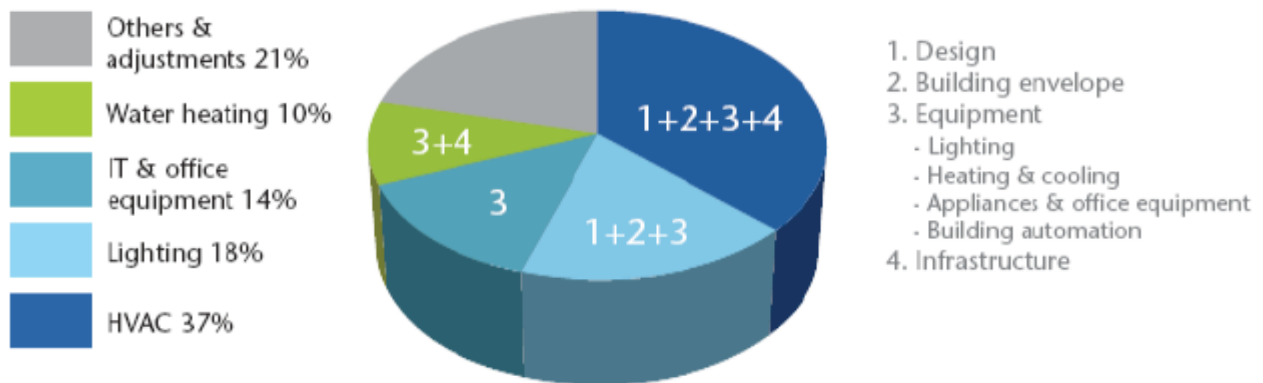



FIG-3 DESIGN IMPACTS ON ENERGY USE (SOURCE: WBCSD, 2007)

1.3.1 Interventi passivi

1.3.1.1 Interventi in fase di progetto

Sono da considerarsi interventi passivi tutti quelli attuabili in fase di progettazione dell'edificio; tra essi i più importanti riguardano la scelta dell'orientamento e della forma del'edificio e la scelta della tipologia di involucro. La scelta dell'orientamento è fondamentale per la protezione dell'edificio dalla radiazione estiva e per l'ottimizzazione della stessa nella stagione invernale. L'orientamento viene definito mediante l'angolo azimutale (fig. 4) che quantifica l'inclinazione della facciata prevalente rispetto al Sud.

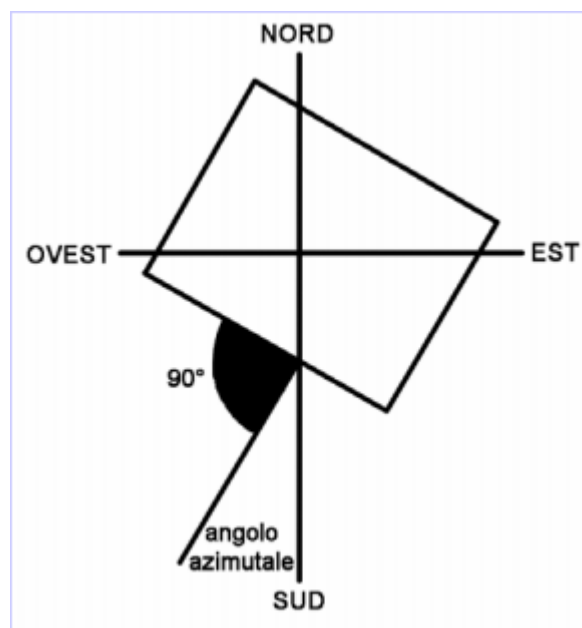



FIG-4 ANGOLO AZIMUTALE

Una superficie orizzontale non risente dell'orientamento e riceve il massimo di energia d'estate quando la posizione del sole è alta nella volta celeste; una superficie verticale è soggetta alla radiazione solare in modo variabile a seconda della sua esposizione rispetto ai punti cardinali, del periodo dell'anno e dell'ora del giorno.

D'inverno, il sole sorge a sud-est e tramonta a sud-ovest, di conseguenza una superficie esposta a sud riceve il sole per tutto l'arco della giornata; in particolare, il lato esposto a sud riceve in inverno circa il doppio della radiazione solare estiva. La posizione del sole, bassa rispetto all'orizzonte, fa si che la radiazione, incidendo quasi ortogonalmente sulla superficie verticale, penetri all'interno degli spazi confinati fornendo il massimo apporto energetico. In estate, il sole sorge a nord-est e tramonta a nord-ovest, le superfici verticali esposte a Est e a Ovest ricevono circa due volte e mezzo più radiazione che in inverno e due-tre volte più radiazione rispetto la facciata esposta a Sud. È soprattutto il lato esposto a Ovest a subire maggiormente il surriscaldamento in quanto all'alto valore della radiazione solare si aggiunge il picco massimo della temperatura.

In primavera e in autunno, gli apporti solari sulla parete verticale sono distribuiti in maniera quasi omogenea per ogni esposizione, ad esclusione di quella settentrionale che è fortemente svantaggiata. In generale, a parità di condizioni atmosferiche, la quantità di radiazione solare incidente varia in rapporto a: latitudine; giorno dell'anno; ora del giorno; inclinazione e orientazione della superficie in esame (fig. 5).

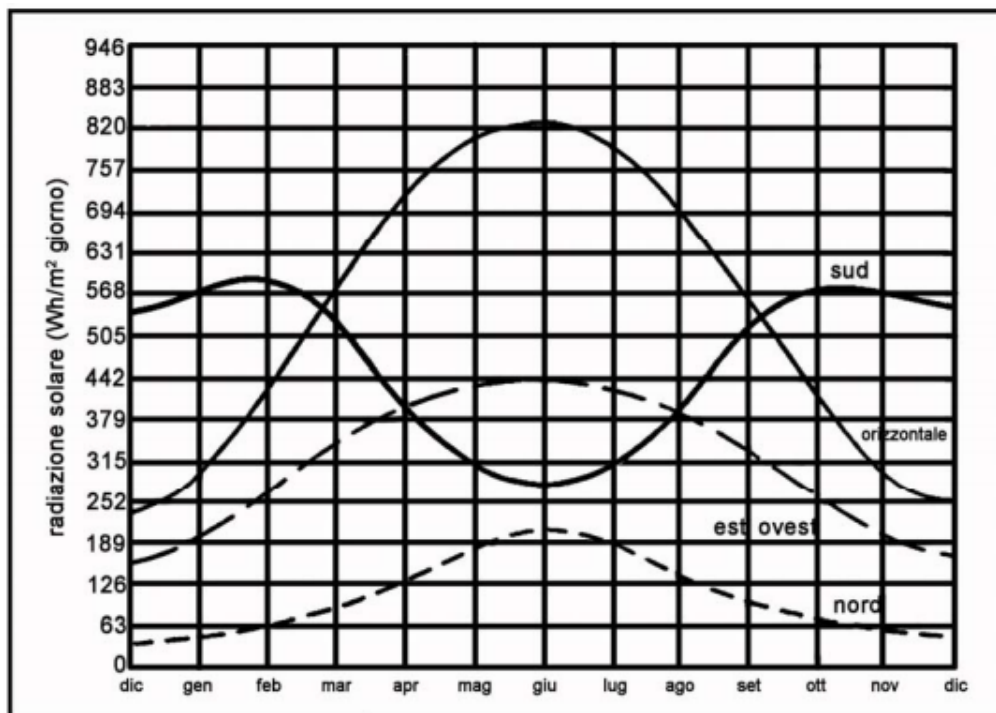



FIG-5 QUANTITÀ DI RADIAZIONE DIRETTA INCIDENTE SU SUPERFICI VERTICALI VARIAMENTE ORIENTATE E SU UNA SUPERFICIE ORIZZONTALE, POSTE A 40° DI LATITUDINE NORD

La scelta della forma dell'edificio incide sensibilmente sugli apporti gratuiti di energia derivanti dall'ambiente esterno come illustrato in figura 6 e 7.

Orientamento della facciata		Apporti di energia solare in % del massimo apporto				
		a	b	c	d	Totale
N (0°)	A	3,67	15,82	50,78	15,82	86,10
	B	2,61	22,49	36,14	22,49	83,74
	C	5,23	11,25	72,27	11,25	100,00
N 22,5°	A	3,83	25,79	46,42	8,25	74,95
	B	2,71	36,76	33,02	11,71	84,20
	C	5,42	18,38	66,04	5,86	95,70
N 45°	A	3,96	36,57	36,57	3,96	81,06
	B	2,80	52,02	26,00	5,60	86,45
	C	5,60	26,00	52,02	2,80	86,45
N 67,5°	A	8,25	46,42	25,79	3,83	74,95
	B	5,85	66,04	18,88	5,42	95,70
	C	11,71	33,02	36,76	2,71	84,20

I valori indicano, per ogni facciata e per l'intero edificio, i relativi apporti in percentuale, 100% equivale all'apporto che riceve la casa C orientata esattamente verso i punti cardinali.

FIG-6

In particolare la forma dell'edificio determina il rapporto superficie volume.

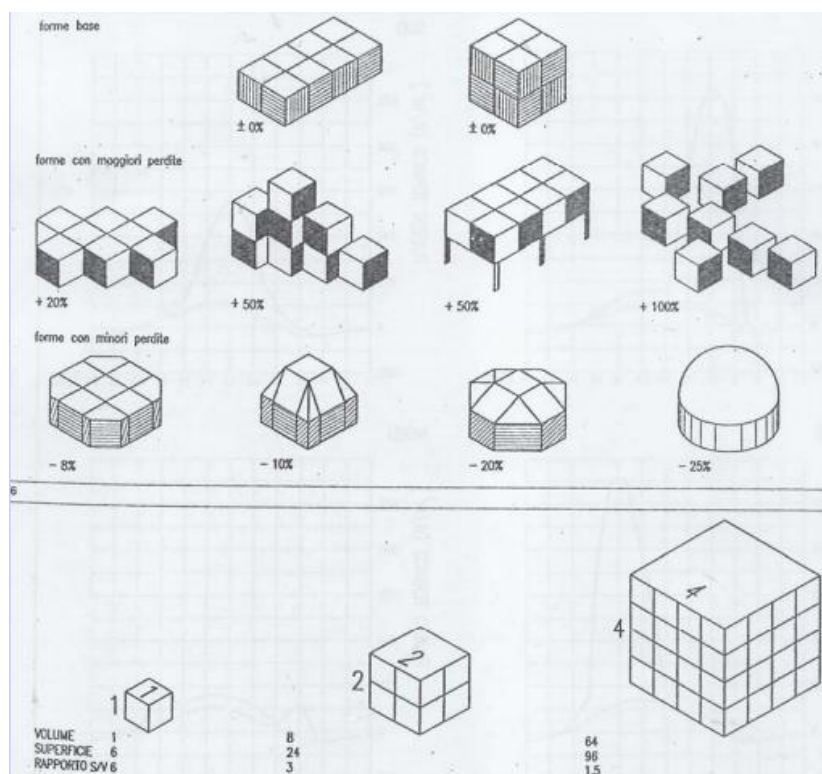



FIG-7

Secondo Olgyay V. (Design with climate, Princeton University Press, Princeton, 1962), la casa quadrata non è la forma ottimale per ogni località, tutte le forme allungate sul lato nord-sud funzionano sia d'inverno che d'estate con minore efficienza di quelle quadrate infine la forma ottimale sta in ogni caso in una forma allungata lungo la direzione Est-Ovest.

L'involucro dell'edificio è il punto di partenza dell'efficienza energetica di un edificio; integrato con i sistemi di condizionamento, ventilazione e illuminazione; mentre il design riunisce tutti gli elementi che influenzano il consumo di energia (WBSCD, 2007).
La scelta in sede progettuale è dunque fondamentale per implementare un efficiente sistema di isolamento; l'involucro ha molteplici finalità:

- minimizzare le dispersioni termiche;
- consentire la traspirazione;
- consentire l'accumulo (massa).

Uno degli aspetti più importanti di un edificio è quello della scelta dei materiali.
Il materiale che costituisce l'involucro esterno influisce sulla capacità di traspirazione
(importante per prevenire la sindrome dell'edificio malato, spesso causata da muffe, polvere, e composti organici volatili che possono essere origine di malattie), sulla temperatura di esercizio, sul consumo di energia grigia di un edificio e infine sulla sua longevità e la sua forza contro i terremoti. Oggi ci sono una varietà di materiali tra cui scegliere per raggiungere questi obiettivi, tenendo conto della tipologia di edificio, della sua destinazione d'uso, della disponibilità di materiali (meglio se locali) e del contesto climatico in cui è inserito.

1.3.1.2 Isolamento

I materiali isolanti sono lo strumento chiave nella progettazione e nella costruzione di edifici a basso consumo di energia. Ciò è dimostrato dal crescente spessore utilizzato nella loro costruzione che si riflette anche nella crescita delle vendite. Il mercato europeo dei materiali di isolamento è caratterizzato dal dominio di due principali gruppi: materiali inorganici e organici. Entrambi sono dotati di simili prestazioni in termini di capacità isolanti, ma comunque sono presenti differenze significative. Nonostante il fatto che le proprietà termiche dei materiali non sono migliorate significativamente nel decennio, una serie di altre caratteristiche, come la reazione al fuoco e

all'umidità o alcune proprietà meccaniche, hanno subito un netto miglioramento, talvolta anche a costo della capacità di isolamento. Inoltre, gli aspetti ambientali e sanitari svolgono un ruolo crescente nella ricerca "ottimale" dei materiali (Papadopoulos, 2004).
L'isolamento, perciò, è il primo passo per un uso razionale dell'energia utilizzata per la costruzione.
Investire in una nuova e tecnologica caldaia non da molti risultati se il problema dell'isolamento non è stato affrontato. L'isolamento del tetto è particolarmente importante per l'edificio residenziale in quanto oltre un quarto del calore di una casa sfugge attraverso il tetto. Il tetto verde per esempio è uno dei progetti della bioedilizia, ad esso si associa il " green-effect" risultando molto piacevole alla vista. In realtà un tappeto di erba sul tetto non solo isola l'edificio, ma assorbe anche l'acqua e contribuisce a evitare allagamenti. L'utilizzo di isolanti naturali a basso impatto ecologico è un'altra applicazione piuttosto vantaggiosa dal punto di vista ambientale in quanto il loro uso, sempre più crescente, favorisce una diminuzione dei materiali isolanti tradizionali, ovvero di origine sintetica, che oltre ad avere un elevato prezzo sul mercato, producono elevati impatti ambientali sia nella fase di produzione che nella fase di smaltimento. Infine la tecnologia del vetro è un altro settore per migliorare l'isolamento dell'edificio. Doppi vetri o addirittura tripli vetri mantengono il calore negli edifici. Le finestre "Smart" permettono alla luce di attraversare, ma bloccano le radiazioni infrarosse e ultraviolette che causano il calore (Zhang & Cooke, 2008).

1.3.2 Interventi attivi

Siemens ha dimostrato che ogni edificio, attraverso l'uso di alcune tecnologia applicative, ha già oggi un potenziale miglioramento dell'efficienza energetica in media del 20-30%. Ciò può essere ottenuto ottimizzando la gestione dell'edificio a partire dal sistema d'illuminazione, al riscaldamento e raffreddamento, all'uso di acqua e alla distribuzione dell'energia (Griggs, 2009).
Di seguito sono elencati alcuni esempi di efficienti tecnologie nel settore della bioedilizia:

1.3.2.1 Produzione di energia

I pannelli solari possono essere collegati ai tetti degli edifici e impianti per il mini-eolico possono essere attaccati alle pareti per generare energia elettrica dalle risorse naturali. Caldaie a biomassa possono fornire riscaldamento e acqua calda (Zhang & Cooke, 2008).

1.3.2.2 Tecnologie per il riscaldamento / raffreddamento

La maggior parte dei consumi energetici in edilizia va al riscaldamento, alla ventilazione e all'utilizzo di aria condizionata per il raffreddamento; il tutto pari al 55% del consumo energetico negli edifici residenziali e del 35% negli edifici commerciali.
L'utilizzo di efficienti caldaie e condizionatori d'aria sono necessari per mantenere la climatizzazione degli interni in modo efficiente. Inoltre il calore generato dall'uso di computer e di altri dispositivi elettronici può essere riciclato per riscaldare l'edificio se le camere sono appositamente progettate. Le pompe di calore e gli scambiatori di calore devono essere in grado di trasferire il calore da una parte dell'edificio ad un'altra o per riscaldare l'acqua (Zhang & Cooke, 2008).

1.3.2.3 Illuminazione

L'illuminazione rappresenta il 4% del consumo energetico nelle case e fino al 30% dell'energia da utilizzare negli edifici commerciali. Il controllo della luce e l'utilizzo dei contatori intelligenti sono una buona soluzione per ridurre il consumo energetico negli edifici. Il controllo della luce, per esempio, è costituito da una rete di sensori in grado di spegnere le luci quando le persone non sono presenti. I contatori intelligenti possono monitorare dove e come l'energia viene utilizzata nella costruzione, contribuendo così a scegliere la soluzione ottima per migliorarne l'efficienza. Il mercato dell'illuminazione a LED (Light Emitting Diode) è cresciuto parecchio in questi ultimi anni, spesso se ne fa uso negli schermi dei cellulari, per la retroilluminazione dei notebook, PC, TV e monitor. L'illuminazione a LED offre una migliore luminosità e un maggior contrasto, un ottimo risparmio energetico e risulta essere dieci volte più efficiente delle lampadine tradizionali. La società Bridgelux nella Silicon Valley ha fatto della tecnologia a LED una applicazione per la casa e per l'illuminazione stradale. Si stima che circa il 20% dell'energia elettrica mondiale viene utilizzato per l'illuminazione di potenza che produce circa 1.9Gt di CO_2 all'anno. Questa tecnologia contribuirà a ridurre la domanda dell'energia elettrica del 75%. Tuttavia, le lampade LED sono più costose rispetto alle lampade convenzionali (Zhang & Cooke, 2008).

1.4 La casa passiva e la ristrutturazione degli edifici esistenti

Come evidenziato in precedenza, l'energia viene sprecata molto in un edificio a causa della cattiva progettazione, della la tecnologia inadeguata e dell'uso di pratiche inappropriate, per questo sta trovando largo uso la casa passiva che ha come scopo quello di ridurre il consumo energetico e le emissioni di gas serra. La "Casa passiva" (Passivhaus in tedesco) dunque si riferisce ad edifici costruiti in Europa principalmente ad alta efficienza energetica, ovvero case che richiedono poca energia per il riscaldamento o per il raffreddamento. Di fatto è un edificio il cui fabbisogno energetico per il riscaldamento è uguale o inferiore a 15 kWh/m^{2}a. Essa non ha vincoli estetici o progettuali poiché non rappresenta standard energetici o costruttivi bensì è il risultato dell'applicazione simultanea di più misure energetiche. Le case passive possono essere riscaldate non solo dal sole, ma anche dal calore di apparecchi e persino dai corpi degli occupanti. Secondo un rapporto del World Business Council per lo Sviluppo Sostenibile (WBCSD, 2007), ci sono cinque elementi chiave per le case passive:

1) L'involucro- tutti i componenti dovrebbero essere altamente isolati.
2) L'ermeticità - perdite d'aria attraverso fessure e giunti d' arresto.
3) La ventilazione - utilizzare un sistema meccanico con recupero del calore.
4) I ponti termici - perdita di calore di controllo da più punti male isolati, come finestra e porte.
5) Finestre- minimizzare le perdite di calore in inverno e guadagno di calore in estate.

Infine alcuni studi dell'UE15, inoltre mostrano che il consumo per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici esistenti può essere più che dimezzato mediante ristrutturazioni. Negli Stati Uniti, si stima che fino al 50% dell'energia negli edifici viene persa a causa di un isolamento inadeguato. Nei paesi sviluppati, due terzi degli edifici che dovrebbero esistere nel 2050 sono stati già costruiti. Questo indica perciò che la ristrutturazione di edifici esistenti può svolgere un ruolo importante per ridurre le emissioni degli edifici e portare benefici sia dal puto di vista ambientale che energetico (F.Zhang & P.Cooke, 2010).

1.5 Alcuni strumenti utili

Il peso rilevante del settore edilizio nel bilancio energetico di ogni singolo Paese dell'Unione Europea implica la necessità di regolamentazione e di nuovi meccanismi di mercato, come la certificazione energetica, per strutturare l'applicazione della valutazione energetica nel settore edilizio. La Direttiva 2002/91/CE, applicando le linee guida delineate nella Direttiva 93/76/CEE, stabilisce una struttura generale nella quale la valutazione energetica dell'edificio dovrebbe essere implementata. Gli Stati membri devono stabilire standard minimi di prestazione energetica e schemi di certificazione energetica che consentano al settore edilizio di raggiungere migliori livelli di performance, promuovendo misure di efficienza energetica (standard di architettura bioclimatica, riscaldamento e condizionamento passivi, integrazione delle fonti rinnovabili, etc.) (Ardente et al., 2008). Molte normative di carattere edilizio stanno già investendo notevoli sforzi nel tentativo di affermare un nuovo modello di edilizia sostenibile, cercando collaborazione nell'industria e nei principali comitati decisionali. Numerose innovazioni degli edifici e delle loro tecnologie sono già state definite potenzialmente sostenibili, ma in assenza di un approccio puramente olistico relativo alla valutazione di tali vie percorribili, risulta ancora difficile la loro affermazione definitiva (Kahhat et al., 2009). Il Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) è stato sviluppato nel Regno Unito nel 1990. È il primo strumento utile per affrontare la valutazione ambientale degli edifici in tutto il mondo (Retzlaff, 2009). Questo metodo definisce quale sia la migliore prassi nella progettazione sostenibile ed è diventata la misura utilizzata per descrivere una prestazione ambientale dell'edificio. I crediti sono assegnati in nove categorie: la gestione, la salute e il benessere, l'energia; i trasporti, l'acqua, i materiali, i rifiuti, l'uso del suolo, l'ecologia e l'inquinamento. Questi crediti vengono poi sommati per produrre un unico punteggio complessivo su una scala da sufficiente a buono, molto buono e eccellente.

Successivamente è stata sviluppata nel 1998, dall'US Green Building Council, la certificazione Leadership in Energy and Environmental Design (LEED).Gli edifici con il certificato LEED sono tenuti a utilizzare le risorse in modo più efficiente rispetto agli edifici convenzionali, fornendo un lavoro e ambienti di vita più sani. Nel processo LEED è definito cosa significa per un edificio essere sostenibile e come gli architetti, gli ingegneri, i costruttori, i proprietari e gli sviluppatori devono affrontare la creazione degli edifici verdi (F.Zhang & P.Cooke, 2010). Un edificio può accumulare punti verso una LEED con certificazioni in varie categorie, come i siti sostenibili, una maggiore efficienza energetica, minor consumo di acqua, minor emissioni in atmosfera, minor uso di materiali e di risorse, alta qualità ambientale e innovazione nel design. Il sistema LEED è stato sviluppato principalmente su base volontaria ed è stato adottato ampiamente per i progetti

delle bioedilizia. La figura 8 mostra una rapida crescita del LEED per le nuove costruzioni nel periodo 2000-2006 (F.Zhang & P.Cooke, 2010). La LEED è cresciuta fino a comprendere più oltre 14.000 progetti negli Stati Uniti e la copertura di oltre 30 paesi (WGBC, 2009). Fino ad oggi, ci sono oltre 6.900 edifici certificati LEED in tutto il mondo (WGBC, 2009). Si stima che il risparmio annuo di CO_2 dall'edificio LEED è di circa 3 milioni di tonnellate sia per l'efficienza energetica sia per l'uso di energie rinnovabili. E crescerà fino a 130 milioni di tonnellate nell'anno 2020 e fino a 320 milioni di tonnellate entro il 2030 (F.Zhang & P.Cooke, 2010).

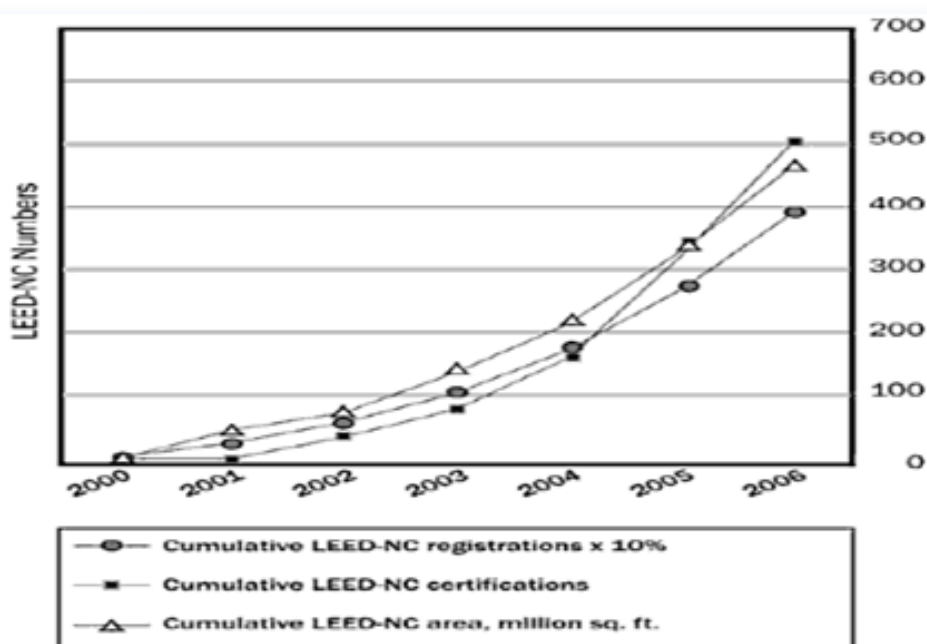



FIG-8 LEED NEW CONSTRUCTION PROJECT GROWTH DURING THE PERIOD 2000-2006. (SOURCE: YUDELSON, 2008)

Inoltre gli edifici verdi offrono vantaggi finanziari che gli edifici convenzionali non offrono. I vantaggi sono la riduzione dei costi dell'energia, dell'acqua e dei rifiuti, inferiori emissioni di CO_2, aumento della produttività e della salute, e un risparmio di circa $ 50 - $ 70 per metro quadro (F.Zhang & P.Cooke, 2010) . Il governo americano sta giocando un ruolo significativo nella promozione della bioedilizia attraverso alcuni regolamenti. Ad esempio gli edifici con certificati LEED guadagneranno una priorità nella licenza edilizia, un credito d'imposta e altre incentivazioni per la promozione della bioedilizia. E' stato sviluppato inoltre, da USGBC, un nuovo sistema di valutazione LEED per lo sviluppo del quartiere: ovvero quello di integrare il principio di una crescita intelligente con una nuova urbanistica bioedilizia già nel primo passo per la progettazione del quartiere (WGBC, 2009). Questo può essere di particolare interesse

per gli urbanisti, a causa della loro attenzione alla costruzione del paesaggio e alla sostenibilità della comunità (F.Zhang & P.Cooke, 2010). Accanto agli schemi obbligatori di certificazione energetica, se ne stanno affermando altri di nuova concezione, che non rientrano ancora negli schemi classici della certificazione – e sono dunque ad adesione volontaria – ma che stanno dando risultati molto positivi nel campo del risparmio energetico: ad esempio, con la sostituzione dei materiali di costruzione tradizionali (es. calcestruzzo rinforzato) con nuovi materiali caratterizzati da un più basso contenuto di energia inglobata, il risparmio energetico sul ciclo di vita di cinquant'anni di un edificio può arrivare ad essere dell'ordine del 20% (Ortiz et al., 2010). Tali procedure, oltre a favorire l'uso delle energie rinnovabili e gli impianti ad alta efficienza energetica, danno alta priorità all'ecodesign, cioè all'uso di materiali a basso impatto, naturali, riciclabili e disponibili a livello locale, alla minimizzazione del consumo idrico progettando sistemi di collettamento dell'acqua piovana e reti per l'acqua grigia negli edifici, alla progettazione di tetti verdi, etc. (Bribián et al., 2009). Attualmente a livello architettonico, i principali strumenti a disposizione dell'ESD (European Sustainable Design) sono: celle fotovoltaiche per la produzione in loco di energia rinnovabile; utilizzo di materiali (strutturali e non) a bassa energia primaria (o inglobata) che permettano di ridurre le emissioni soprattutto della fase di costruzione dell'edificio; sfruttamento dell'energia solare per l'erogazione di acqua calda sanitaria; sistemi di ricircolo di vapori ed acque grigie; efficienti sistemi di utilizzo dell'acqua sanitaria. Anche le misure "passive" di ecodesign possono migliorare il consumo energetico operativo dell'edificio. Come visto in precedenza, alcuni esempi di misure "passive" sono: la massimizzazione dell'incidenza solare attraverso il corretto orientamento dell'edificio; lo sfruttamento massimo della ventilazione passiva dovuta all'orientamento e alla struttura della costruzione; la disposizione strategica dei materiali con buone caratteristiche termicamente isolanti (Flower & Sanjayan, 2007).

1.6 Considerazioni finali

Ogni giorno i costi dell'energia e il riscaldamento globale sono in aumento, la crescita della popolazione e altri fattori contribuiscono sempre di più alla scarsità dell'acqua ed a una limitazione delle risorse naturali. Una rivoluzione bioedilizia è davvero necessaria perché solo attraverso un approccio alternativo si può sia migliorare l'efficienza energetica, per far fronte alle sfide del cambiamento climatico globale e alla sicurezza energetica, ma anche ridurre o eliminare materiali pericolosi come il cemento e sostanze chimiche tossiche. La bioedilizia può davvero contribuire alla soluzione di molti problemi globali associati al cambiamento climatico, alla salute umana e alla

qualità dell'ambiente. Si ritiene che gli edifici “verdi” diventeranno presto la prassi nel settore edilizio, invece che solo un mercato di nicchia. Nel prossimo futuro si faranno ulteriori passi per la trasformazione di edifici tradizionali ad edifici verdi.

Facendo un breve riepilogo ci sono tre approcci principali per il raggiungimento di questo obiettivo energetico. Il primo è quello di ridurre la domanda di energia dell'edificio attraverso l'utilizzo di una maggiore efficienza energetica, un adeguato isolamento (con l’utilizzo di materiale naturale) e attrezzature a basso impatto. In secondo luogo, incentivando le energie rinnovabili e diminuendo lo spreco di risorse energetiche per la costruzione di nuovi edifici. Infine, con la creazione di nuovi edifici che attraverso il surplus di energia prodotta condividono l'energia. Con l’utilizzo di una buona regolamentazione e una migliore costruzione standard, possono essere ottenute enormi riduzioni delle emissioni potenziali andando ad incidere particolarmente nelle grandi economie emergenti. Molte città dei paesi in via di sviluppo come la Cina si stanno rapidamente urbanizzando, richiedendo così alti tassi di costruzione di nuovi edifici. Le pressioni di questi nuovi edifici sull'ambiente saranno ancora più intense rispetto a quelle dei paesi più sviluppati (Retzlaff, 2009). Nonostante queste prospettive, ci sono però delle barriere finanziarie per gli investimenti nella bioedilizia. La frammentazione del settore edile non dà incentivi diretti agli investimenti privati. Pertanto gli investimenti privati in questo settore non hanno un significativo impatto su larga scala. Il governo in tutto questo deve svolgere un ruolo importante, che tende a sviluppare strumenti efficaci per promuovere la bioedilizia proprio perché le iniziative locali, regionali e nazionali sono fattori determinanti per la crescita di questo nuovo confine urbanistico (F.Zhang & P.Cooke, 2010). Abbiamo dunque la possibilità di porre rimedio a questa situazione attraverso un intervento progettuale che integri una visione generale delle problematiche, che sia ecologicamente compatibile, supportato da buone conoscenze dei materiali, da nozioni corrette di pianificazione urbana ed extraurbana, recuperando quindi esperienze e concetti storici di interrelazione con il luogo e con la collettività che vi risiede (F.Zhang & P.Cooke, 2010).

CAP. 2 LIFE CYCLE ASSESSMENT

2.1 Life Cycle Assessment (LCA)

In ambito di sviluppo sostenibile, l'Analisi del Ciclo di Vita (Life Cycle Assessment – LCA) fa parte di quella strumentazione metodologica che ha come scopo, attraverso interventi di natura preventiva, quello di minimizzare gli impatti ambientali dei processi produttivi. Uno studio LCA infatti considera l'intera vita di un prodotto, dall'estrazione ed acquisizione delle materie prime, passando attraverso la produzione e trasformazione di materiali ed energia, per proseguire con l'uso e il fine vita. Questo studio "dalla culla alla tomba" viene infatti esaminato attraverso la compilazione di un inventario di ingressi (materiali, energia, risorse naturali) e di uscite (emissioni in aria, acqua, suolo) del sistema. Questa prospettiva allargata consente di evitare spostamenti di potenziali impatti ambientali da una fase all'altra della vita di un prodotto. Uno studio LCA però è focalizzato sugli aspetti ambientali e i possibili impatti ambientali che ne conseguono, mentre non è lo strumento adatto per valutare gli aspetti socio-economici. La procedura per l'esecuzione di uno studio LCA è stata codificata a partire dagli anni '90 dall'Organismo Internazionale per la Standardizzazione ISO (International Organisation for Standardization). ISO è una federazione mondiale di organismi nazionali di standardizzazione. La preparazione degli Standard Internazionali è realizzata dai comitati tecnici (TC Technical Committees) ai quali possono partecipare rappresentanti di ciascun organismo nazionale membro che ritenga di proprio interesse il tema di lavoro del TC. Organizzazioni internazionali governative e non governative possono partecipare ai lavori dei TC in collaborazione con la ISO. La ISO collabora, in particolare, con l'International Electrotechnical Commission (IEC) per tutti i temi riguardanti la standardizzazione elettrotecnica. Attualmente le norma ISO per uno studio LCA sono:

- ISO 14040:2006 Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework,
- ISO 14044:2006 Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines.

L'LCA è una tecnica sviluppata originariamente per valutare gli impatti ambientali dei prodotti e dei processi produttivi. Successivamente il metodo è stato però applicato non solo ai prodotti, ma

anche ai servizi, compresi quelli legati alla gestione dei rifiuti. L'interesse nella LCA è cresciuto rapidamente durante gli anni '90, quando sono comparse anche le prime pubblicazioni scientifiche. A quel tempo si guardava alla LCA con grandi aspettative, ma i suoi risultati venivano spesso criticati. Da quel momento in poi c'è stato un forte sviluppo e un'armonizzazione degli strumenti della LCA che hanno portato al completamento di uno standard internazionale, rappresentato dalle norme ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, integrato con linee guida e manuali; tutto ciò ha incrementato la maturità e la robustezza metodologica della LCA.

La caratteristica fondamentale di questa nuova metodologia è costituita dal modo innovativo di affrontare l'analisi dei sistemi industriali: dall'approccio tipico dell'ingegneria tradizionale, che privilegia lo studio separato dei singoli elementi dei processi produttivi, si passa ad una visione globale del sistema produttivo, in cui tutti i processi di trasformazione, a partire dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento dei prodotti a fine vita, sono presi in considerazione in quanto partecipano alla realizzazione della funzione per la quale essi sono progettati.

La valutazione di sostenibilità di prodotti o tecnologie considera normalmente gli impatti su tre dimensioni: sociale, ambientale ed economica. Una prospettiva di ciclo di vita su tutte e tre le dimensioni consente di evitare il fatto che gli impatti evitati su uno dei tre ambiti abbiano ripercussioni negative sulle altre due dimensioni. Nonostante l'importanza di tutte e tre le prospettive, in quest'ambito ci si occuperà comunque di analisi del ciclo di vita a livello ambientale (Finnveden et al., 2009). La LCA è uno strumento essenziale per la minimizzazione degli impatti ambientali coordinata ad una simultanea azione di spinta verso uno sviluppo sostenibile della società. La valutazione del ciclo di vita come significativo strumento per la gestione ambientale è diventata un criterio riconosciuto a livello internazionale: è la base per stabilire politiche ambientali, e vien generalmente usata per guidare la produzione pulita, lo sviluppo della produzione "verde" e il design in armonia con l'ambiente. Proprio in quest'ottica vanno affermandosi nuove misure normative che cercano di inserire il "life cycle thinking" nei meccanismi del commercio (Junnila, 2008). In letteratura, si distingue tra due diversi tipi di metodologie LCA: quella *attributiva* e quella *consequenziale* (Finnveden et al., 2009). La prima serve ad attribuire a ciascun prodotto un peso relativo nell'impatto ambientale e nel consumo di risorse di un sistema; descrive cioè per ciascun prodotto i principali flussi interagenti con il sistema globale in esame, e utilizza generalmente valori medi. L'approccio consequenziale tenta invece di descrivere le variazioni dei flussi interagenti con il sistema come risultati del cambiamento indotto da una potenziale scelta, utilizzando generalmente valori marginali. L'approccio da utilizzare dipende dal tipo di problematica che ci si propone di risolvere: se lo si vuole impiegare come strumento di supporto alle decisioni, è preferibile la LCA consequenziale; è probabile, ad esempio, che l'approccio consequenziale sia preferibile qualora si

vogliano analizzare le conseguenze ambientali future causate da una decisione politica. Se invece il supporto alle decisioni non è l'obiettivo della LCA, dovrebbe essere utilizzata la LCA attributiva, in quanto è il metodo maggiormente diffuso, e poiché non è richiesta la modellizzazione delle conseguenze delle decisioni, che porterebbe ad un inevitabile appesantimento dello studio (Finnveden et al., 2009). Una LCA consequenziale risulta concettualmente complessa perché include anche questioni economiche, quali ad esempio i costi marginali della produzione, l'elasticità della domanda e dell'offerta, etc. Inoltre, alcuni dei modelli utilizzati nell'analisi sono molto meno trasparenti rispetto al modello statico e lineare della LCA tradizionale. La scelta tra LCA attributiva e consequenziale influenzerà i confini del sistema in relazione alle procedure di allocazione, oltre ad alcune scelte metodologiche, quali ad esempio la definizione dell'unità funzionale e la scelta dei metodi di analisi degli impatti del ciclo di vita. E'dunque opportuno valutare attentamente se la complicazione modellistica e gli ulteriori elementi di incertezza introdotti da un approccio consequenziale consentano effettivamente un miglioramento dei risultati (Hondo et al., 2006; Finnveden et al., 2009).

2.2 Struttura di una LCA

Da un punto di vista metodologico, la definizione di LCA proposta dalla SETAC (1993), oggi formalizzata nella ISO 14040 e 14044, è la seguente: "*è un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale*".

Intesa come tecnica di management energetico-ambientale, sia a livello di gestione dell'attività industriale sia a livello amministrativo, la LCA si propone infine validamente come nuovo supporto per le tecniche ormai consolidate, quali la valutazione d'impatto ambientale e l'analisi di rischio. La struttura moderna della LCA proposta dalla norma ISO 14040:2006 è sintetizzabile in quattro momenti principali:

1. Definizione degli Scopi e degli Obiettivi (*Goal definition and Scoping)*: è la fase preliminare in cui vengono definiti le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato, il fabbisogno di dati, le assunzioni ed i limiti;

2. Analisi di inventario (*Life Cycle Inventory, LCI*): è la prima parte del lavoro, dedicata allo

studio del ciclo di vita del processo o attività. Lo scopo principale è quello di ricostruire la via attraverso cui il fluire dell'energia e dei materiali permette il funzionamento del sistema produttivo in esame tramite tutti i processi di trasformazione e trasporto;

3. Valutazione degli Impatti (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*): è lo studio dell'impatto ambientale provocato dal processo o attività ed ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni generate a seguito dei consumi di risorse e dei rilasci nell'ambiente calcolati nell'inventario;

4. Interpretazione dei risultati (*Life Cycle Interpretation*): è la parte conclusiva di una LCA ed ha lo scopo di proporre i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati (Baldo et al., 2008).

2.2.1 Fase 1: Definizione dell'obiettivo e delle finalità dello studio

Una LCA deve essere necessariamente preceduta a una esplicita dichiarazione degli obiettivi e della finalità dello studio.

Da un punto di vista normativo, la ISO 14040 introduce così la definizione degli scopi ed obiettivi:

"Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l'applicazione prevista. L'obiettivo di una LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio".

E' evidente come le finalità dello studio influenzino notevolmente le scelte e le ipotesi di lavoro, in quanto, a seconda delle motivazioni, del pubblico a cui è destinato, delle risorse a disposizione e delle aspettative dei risultati, possono risultare scenari completamente diversi. Tra le caratteristiche di un LCA fortemente dipendenti dalle finalità è possibile citare: l'ampiezza del ciclo di vita, le eventuali alternative da considerare, l'integrazione con aspetti non ambientali, la qualità dei dati e la scelta dei parametri, l'estensione della fase di valutazione e miglioramento, il livello di dettaglio a cui arrivare. Prima di procedere con l'analisi dei dati è importante definire il sistema che cosa si vuole analizzare e l'unità con cui normalizzare le informazioni raccolte.

Nell'ottica LCA viene definito sistema un qualsiasi insieme di dispositivi che realizzano una o più precise operazioni industriali aventi la medesima funzione; esso è delimitato da appropriati confini fisici rispetto al sistema ambiente e con questo ha rapporti di scambio caratterizzati da una serie di input e output. Tali sistemi hanno un gran numero di operazioni collegate fra di loro, anche in modo molto complesso, dai flussi di materiali , di energia e di prodotti finali.

Un sistema produttivo generalmente svolge un certo numero di funzioni, ma normalmente solo una viene selezionata per lo studio LCA in base agli obiettivi e allo scopo. E' importante definire, fin dall'inizio dello studio, un'unità di misura di riferimento chiamata appunto: unità funzionale, con cui trattare ed esporre i dati e le informazioni di una LCA (Baldo et al., 2008). L'unità funzionale definisce in maniera quantitativa la funzione individuata. Lo scopo primario di un'unità funzionale perciò è quello di fornire il sistema di riferimento per tutti i flussi in ingresso e uscita dal sistema. La scelta di tale unità è arbitraria e dipende essenzialmente dallo scopo per cui i sottosistemi e il sistema globale sono stati creati. Si definisce invece flusso di riferimento la quantità di prodotto necessaria a soddisfare la funzione scelta.

I confini del sistema invece definiscono numero e tipologia di unità di processo da includere nel sistema. Possono essere determinati, inizialmente, con criteri geografici, tecnologici e temporali; poi sarà compito del richiedente lo studio, escludere determinate fasi dell'intero ciclo produttivo.

In linea di principio il sistema produttivo deve essere modellato in modo tale che i flussi in ingresso e uscita dai suoi confini siano solo flussi elementari. Si definisce flusso elementare:

- un flusso di materia o energia entrante nel sistema che è stato prelevato dall'ambiente senza alcuna trasformazione da parte dell'uomo;
- un flusso di materia o energia uscente dal sistema che non subisce alcun altra trasformazione da parte dell'uomo. La scelta delle unità di processo da includere nel sistema dipende in primo luogo dagli obiettivi dello studio LCA. E'ovviamente necessario in ogni studio stabilire dei criteri di cutoff, che devono essere ben compresi e spiegati nel rapporto stesso. In base a questo si stabilisce il grado di affidabilità e confidenza dello studio. Le unità di processo normalmente comprese in uno studio LCA sono:

• acquisizione di materie prime
• distribuzione e trasporto
• produzione e uso di combustibili, elettricità e calore
• uso del prodotto e manutenzione
• smaltimento dei rifiuti di processo e del prodotto stesso
• recupero del prodotto usato (riuso, riciclo e recupero energetico)
• produzione di materiali ancillari

• produzione, manutenzione e smaltimento delle attrezzature
• operazioni addizionali come illuminazione e riscaldamento
Nei casi reali un sistema produttivo o anche una singola unità di processo realizzano più di una funzione ovvero quando si hanno co-prodotti o riusi e ricircoli, ossia la formazione di due o più prodotti come output in un processo, si è di fronte ad un caso di multi-funzionalità. Tali processi si definiscono multifunzionali e in questi casi, è necessario suddividere i flussi materiali e energetici di ciascun processo tra le diverse funzioni (allocazione). Per quanto riguarda i requisiti di qualità dei dati che stanno ad indicare in termini generali le caratteristiche dei dati necessari per lo studio, questi dovrebbero comprendere:

- le fonti di dati e la loro rappresentatività;
- i fattori relativi al tempo, alla geografia e alla tecnologia;
- la precisione, completezza e rappresentatività dei dati;
- la coerenza e riproducibilità dei metodi usati nella LCA;
- l'incertezza dell'informazione.

2.2.2 Fase 2: L'analisi di inventario

Seguendo la definizione fornita dalla norma ISO 14040, è in questa fase che vengono *"individuati e quantificati i flussi in ingresso e in uscita da un sistema di prodotto, lungo tutta la sua vita"*.
L'analisi di inventario (LCI, Life Cycle Inventory) è la fase più importante nel processo di LCA (Xing et al., 2008). E' la seconda fase di uno studio di LCA e ne costituisce la parte più impegnativa e più importante procedendo alla costruzione di un modello analogico della realtà in grado di rappresentare nella maniera più fedele possibile tutti gli scambi tra i singoli processi appartenenti alla catena produttiva effettiva (Baldo et al., 2008). Lo scopo di questa fase è evidenziare tutti i flussi di input e di output (riferiti all'unità funzionale) connessi alle diverse fasi del ciclo di vita di un prodotto, costruendo un diagramma di flusso. Tali flussi sono espressi in unità fisiche (unità di massa e di energia) e riguardano sia il prelievo e la preparazione delle materie prime, la loro trasformazione in prodotti finiti, co-prodotti, sottoprodotti con l'immissione di agenti inquinanti nell'aria, nell'acqua e nel suolo, sia il prelievo delle fonti di energia, il loro uso e i rilasci associati nei diversi comparti ambientali, nelle diverse fasi del sistema esaminato.
La fase di inventario comprende:
- la definizione di un modello con relativo diagramma di flusso del sistema che comporta la suddivisione in unità di processo, la descrizione delle unità stesse in termini di condizioni operative

ai fini di individuare i flussi di massa, di energia e di ogni altra grandezza fisica giudicata rilevante ai fini dello studio;
- la raccolta dei dati relativi ai flussi elementari in ingresso e uscita da ciascuna unità di processo.
Per ogni unità di processo compresa nei confini del sistema, i dati possono essere classificati in grandi categorie quali:
o input energetici, materie prime, input ausiliari;
o prodotti, co-prodotti e rifiuti;
o emissioni in aria, scarichi nelle acque e nel suolo;
o altri aspetti ambientali;
- la validazione dei dati sulla base della descrizione dell'unità di processo attraverso bilanci di massa, energia o altre relazioni pertinenti alla specifica unità in oggetto;
- il trattamento dei dati, ad esempio operazioni di media temporale, analisi statistica nel caso di processi equivalenti analizzati.
Il risultato finale di questo procedimento è una sorta di bilancio ambientale, con una serie di voci relative al consumo di materie prime e alle emissioni inquinanti in aria, acqua e suolo. Per la redazione di tale bilancio, dovrà essere controllata la qualità dei dati, in quanto è su quest'ultima che si fonda la validità e l'attendibilità di tutto lo studio di LCA Per quanto possibile, i dati da utilizzare nella fase di inventario devono essere raccolti direttamente sul campo. Infatti, l'utilizzo delle banche dati, pur semplificando di molto la ricerca delle informazioni, pone il problema dell'attendibilità della fonte e della correttezza dell'interpretazione. Infine i risultati della LCI devono essere sempre interpretati sulla base dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio.

2.2.3 Fase 3: L'analisi degli impatti

Le informazioni ottenute dall'analisi di inventario costituiscono la base di partenza per valutazioni di tipo ambientale, di cui è dedicata la fase della LCA definita Life Cycle Impact Assessment (LCIA) e regolata dalle norme ISO 14040 e ISO 14044 (Baldo et al., 2008).
La terza fase della procedura della LCA, così come codificata dalle norme ISO, è volta a valutare il significato degli impatti ambientali potenziali e ha lo scopo di evidenziare l'entità delle alterazioni generate a seguito dei consumi di risorse e dei rilasci nell'ambiente calcolati nell'inventario.
L'analisi degli impatti implica un processo di revisione degli obiettivi e degli scopi dello studio ed è diverso dagli altri metodi di valutazione delle prestazioni ambientali essendo un approccio relativo basato sull'unità funzionale. Scelta, modellazione e calcolo delle categorie di impatto introducono generalmente un elemento di soggettività nello studio. Tale fase è composta da più elementi, come

descritto nella norma ISO 14044, i primi dei quali obbligatori e gli ultimi opzionali. Le fasi obbligatorie del Life Cycle Impact Assessment sono:

a) La scelta delle categorie di impatto, degli indicatori di categoria e dei modelli di caratterizzazione;

b) Dopo la fase di selezione, il secondo elemento obbligatorio di un LCIA è la **classificazione**, cioè l'assegnazione dei risultati dell'inventario alle categorie di impatto prescelte, ponendo attenzione all'esclusività dell'assegnazione, un esempio è mostrato in figura 1. Alcuni risultati del LCI sono assegnati ad un'unica categoria di impatto, mentre altri possono essere collegati a più di una categoria. In questo secondo caso è opportuno distinguere tra meccanismi paralleli e sequenziali;

c) La terza fase obbligatoria del LCIA è la **caratterizzazione**, cioè il calcolo degli indicatori di impatto relativi agli ingressi e uscite del sistema. I dati di inventario vengono convertiti attraverso i fattori di caratterizzazione in una sola grandezza che può così essere sommata su tutti i flussi; questa operazione fornisce un risultato numerico, generalmente dotato di una dimensione, che rappresenta la quantificazione dell'impatto considerato.

Le fasi opzionali della LCIA sono:

1) **La normalizzazione** effettua il calcolo del risultato di un indicatore di categoria rispetto ad un valore di riferimento. Lo scopo è quello di evidenziare il valore relativo di ciascun indicatore. La normalizzazione infatti spesso avviene dividendo il risultato di un indicatore per un valore di riferimento selezionato a priori.

Le scelte più comuni sono:

– Il valore complessivo della grandezza in questione per una data area globale, regionale, nazionale o locale che sia;

– Il valore complessivo per una data area e per persona;

– Il valore della grandezza in questione in uno scenario di riferimento.

2**) Il raggruppamento** consiste nella suddivisione delle categorie di impatto selezionate in uno o più insiemi pre-definiti nella fase iniziale. Una procedura utilizzata spesso negli eco-indicatori è quella di predefinire delle macrocategorie di danno (salute umana, risorse non rinnovabili, danni all'ecosistema, ecc.) e raggruppare le categorie di impatto in base al ruolo che hanno in ciascuna categoria di danno. Normalmente una categoria di impatto viene allocata in una sola categoria di danno. Il raggruppamento è una forma di classificazione delle categorie di impatto.

3) **La pesatura** è quella procedura qualitativa e/o quantitativa in cui l'importanza relativa di una categoria di impatto viene confrontata con quella delle altre categorie. Si chiamano fattori di pesatura i pesi relativi delle diverse categorie di impatto. Lo scopo di questa operazione è quello di giungere ad un risultato finale rappresentato da un unico indice, che definisca l'impatto globale esercitato dall'attività in esame (Baldo et al., 2008):

I metodi per generare i fattori di pesatura si basano essenzialmente sulle scienze sociali e sono affetti ad un certo grado di soggettività.

Nella fase di pesatura i risultati degli indicatori di categoria, eventualmente normalizzati, vengono convertiti in valori pesati mediante fattori numerici che traducono il peso relativo che l'analista attribuisce a quella categoria di impatto. Spesso la pesatura viene effettuata sulle categorie di danno, risultanti dalla fase di raggruppamento. I principali tipi di approccio per l'assegnazione dei pesi alle varie categorie di impatto sono i seguenti (Baldo et al., 2008):

- Approccio mandatario;
- Monetizzazione;
- Distanza dall'obiettivo;
- Valutazione di esperti;
- Approccio tecnologico.

La logica che normalmente si segue è la seguente:

– Normalizzare i risultati della caratterizzazione in modo da avere dati omogenei, quantomeno all'interno della stessa categoria di danno;

– Raggruppare le categorie di impatto in macrocategorie di danno;

– Pesare le macrocategorie di danno.

Emissioni	Riscaldamento globale	Tossicità umana	Formazione fotochimica di ozono	Acidificazione
Anidride carbonica fossile	×			
Ossidi di zolfo		×	×	×
Composti organici volatili non metanici			×	
Metano	×		×	
Ossidi di azoto		×	×	×
Particolato PM_{10}		×		
Propano			×	
Butano			×	
Formaldeide			×	
Benzene		×	×	
Toluene			×	
Idrocarburi policiclici aromatici		×		
Metalli (es. As, Pb, Cr, Cu, Zn, Ni, V)		×		
Mercurio		×		
Diossine/furani		×		
Etilene			×	
Acido fluoridrico		×		
Ammoniaca		×		×
Acido cloridrico		×		
Protossido d'azoto	×			
Monossido di carbonio			×	

FIG-1 ESEMPIO DI CLASSIFICAZIONE

2.2.4 Fase 4: Interpretazione e miglioramento

La norma ISO 14040 definisce questa quarta fase di una LCA come il momento in cui realizzare una valida correlazione tra i risultati dell'analisi di inventario e di quella degli impatti, per proporre utili raccomandazioni in conformità tra lo scopo e gli obiettivi dello studio. Suddetta norma inoltre contempla anche questa parte dell'analisi e nella definizione dell'obiettivo dell'interpretazione richiama fortemente il fatto che solo una chiara e comprensibile, completa e consistente presentazione dei risultati delle fasi precedenti è in grado di fornire quelle indicazioni utili a impostare i possibili miglioramenti del sistema in esame. In particolare, la norma indica le seguenti fase operative:

- identificazione degli aspetti principali evidenziati dai risultati delle fasi precedenti;

- controllo ulteriore tramite analisi di sensibilità;
- conclusioni evidenziando i limiti, raccomandazioni.

Va inoltre evidenziato come la fase di interpretazione possa essere condotta su tutti o solo su parte degli indicatori ambientali propri di una LCA, anche in relazione ai parametri su cui l'azienda intende incentrare le proprie attività interne e di comunicazione. Un' analisi delle azioni strategiche potrà portare all'elaborazione di un indicatore specifico da monitorare che potrà costituire nel tempo un parametro di miglioramento su cui focalizzare l'attenzione durante la fase di interpretazione (Baldo et al., 2008).

2.3 Caratteristiche principali e limiti dell' LCA

Sebbene la LCA sia riconosciuta come il migliore strumento per la valutazione degli impatti dei prodotti durante l'intero loro ciclo di vita, ci sono ancora molti problemi pratici da risolvere prima che la LCA tradizionale possa esser largamente utilizzata nella gestione del profilo ambientale delle aziende.
Di seguito sono elencate le caratteristiche di uno studio LCA e le limitazione a cui è soggetto:

- L'LCA esamina in modo sistematico gli aspetti ambientali e gli impatti dei sistemi di prodotto, dall'acquisizione delle materie prime allo smaltimento finale, in conformità all'obiettivo e campo di applicazione definiti.
- La natura relativa dell'LCA è dovuta alla caratteristica di unità funzionale della metodologia.
- Il grado di dettaglio e l'estensione temporale dell'LCA possono variare ampiamente, in funzione della definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione.
- Requisiti specifici sono applicati all'LCA, destinati ad essere usati per effettuare asserzioni comparative divulgate al pubblico.
- Non esiste un unico metodo per condurre l'LCA.
- Non esistono basi scientifiche per la riduzione dei risultati dell'LCA a un singolo punteggio o numero complessivo.
- L'interpretazione del ciclo di vita richiede l'uso di un procedimento iterativo.
- L'LCA tratta i potenziali impatti ambientali e non prevede impatti ambientali assoluti o precisi a causa di:

1. l'espressione relativa dei potenziali impatti ambientali a un'unità di riferimento;
2. l'integrazione dei dati ambientali nello spazio e nel tempo;

3. l’incertezza intrinseca nella modellazione degli impatti ambientali;
4. il fatto che alcuni possibili impatti ambientali sono chiaramente impatti futuri.

Per quanto riguarda le limitazioni poiché LCA nasce come una evoluzione dell‘ analisi energetica, in essa sono ben descritte e analizzate solo quelle attività che determinano un consumo o una produzione di energia, considerazioni di carattere solo energetico/ambientale, inoltre non vi è nessuna distinzione tra le emissioni avvenute in luoghi differenti, quindi vi è completa perdita dell’informazione spaziale e perciò la LCA non dà informazioni adeguate per decidere la localizzazione di un impianto. In aggiunta a quanto detto in precedenza la significatività dei risultati diminuisce passando dagli effetti globali (es. riscaldamento globale) agli effetti a scala regionale/locale (es. acidificazione) in quanto il peso globale di un determinato inquinante è il risultato di tanti contributi, spesso provenienti da diverse aree geografiche della terra, mentre gli output rilevati sono a loro volta riferiti a diversi periodi di tempo. Inoltre a scala locale i fattori temporali e spaziali delle emissioni hanno più rilevanza.

2.4 Valutazione degli impatti

L’Analisi degli impatti (LCIA), come detto in precedenza, è una delle quattro fasi della procedura di LCA e consiste nel quantificare ed evidenziare ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell’ambiente (emissioni o reflui) e dal consumo di risorse associati a un’attività produttiva l’entità: quindi comprendere gli effetti ambientali, definiti come categorie d’impatto, associati al sistema. Per procedere alla valutazione degli impatti del ciclo di vita di un prodotto è necessario prima di tutto avere chiari quali siano gli aspetti ambientali che si vogliono considerare nell’analisi. La quantificazione dell’impatto di un prodotto, di ciascuna categoria scelta, avviene tramite l’utilizzo di un indicatore, capace di fornire un'informazione sintetica relativa ad uno specifico fenomeno. Le procedure di scelta, misurazione e valutazione (aggregazione in indici) degli indicatori sono soggette a una forte variabilità a seconda della regione, dell’utente decisore, delle condizioni ambientali, etc. Questa fase della LCA inoltre mira a quantificare, con opportuni metodi di caratterizzazione, l’entità del contributo complessivo che il processo o il prodotto ha nei confronti degli effetti considerati. In generale, gli effetti vengono definiti non solo a seconda delle potenziali ricadute sulla salute dell’uomo e sull’ambiente, ma anche in base al loro raggio di influenza introducendo così il concetto di scala dell’effetto. Di seguito sono elencate le maggiori categorie d’impatto:

- Effetto serra;

- Assottigliamento dell'ozono stratosferico;

- Acidificazione;

- Eutrofizzazione;

- Formazione smog fotochimico;

- Consumo di risorse: energia e materiali;

- Tossicità per l'uomo e per l'ambiente;

- Degrado del territorio e altri tipi di disturbo.

Gli impatti o effetti ambientali si suddividono in base alla scala di azione in effetti globali, regionali o locali (tabella 1). Questo aspetto è dovuto fondamentalmente alle caratteristiche fisiche e chimiche dell'emissione che genera l'effetto, nonché chiaramente alle condizioni ambientali.

Categoria di impatto	Scala	Dati LCI rilevanti	Indicatore	Breve descrizione
Riscaldamento globale	Globale	Biossido di carbonio (CO_2) Ossido nitroso (N_2O) Metano (CH_4) Clorofluorocarburi (CFC) Idroclorofluorocarburi (HCFC) Metil Bromuro (CH_3Br)	Potenziale di Riscaldamento Globale	Converte i dati LCI in equivalenti di CO_2
Assottigliamento dell'ozono stratosferico	Globale	Clorofluorocarburi (CFC) Idroclorofluorocarburi (HCFC) Halon Metil Bromuro (CH_3Br)	Potenziale di distruzione dell'ozono	Converte i dati LCI in equivalenti di triclorofluorometano (CFC-11)
Acidificazione	Regionale Locale	Ossidi di zolfo (SO_x) Ossidi di azoto (NO_x) Acido cloridrico (HCl) Acido fluoridrico (HF) Ammoniaca (NH_3)	Potenziale di acidificazione	Converte i dati LCI in equivalenti di ioni idrogeno (H^+)
Eutrofizzazione	Locale	Fosfato (PO_4) Ossido di azoto (NO) Biossido di azoto (NO_2) Nitrati Ammoniaca (NH_3)	Potenziale di eutrofizzazione	Converte i dati LCI in equivalenti di fosfato (PO_3)
Smog fotochimico	Locale	Idrocarburi diversi dal metano (NMHC)	Potenziale di creazione di ossidanti fotochimici	Converte i dati LCI in equivalenti di C_2H_6
Uso del territorio	Locale	Quantità di superficie occupata	Superficie	Converte i dati LCI in equivalenti di superficie utile all'assorbimento di CO_2
Ecotossicità e tossicità per l'uomo	Locale	Composti chimici tossici con una concentrazione letale nota sugli organismi naturali e sull'uomo	LC_{50}	Converte i dati LCI in equivalenti
Impoverimento delle risorse naturali, abiotiche e biotiche	Globale Regionale Locale	Quantità di risorse utilizzate	Potenziale di impoverimento	Converte i dati LCI in un rapporto tra quantità di risorsa usata e quantità lasciata

TAB-1 PRINCIPALI CATEGORIE D'IMPATTO E LA LORO CARATTERIZZAZIONE

2.4.1 Categorie di impatto

Nella fase di valutazione degli impatti, i risultati dell'inventario, come si è detto, vengono espressi come contributi a rilevanti categorie di impatto ambientale. Ciò permette di rappresentare i risultati della valutazione del ciclo di vita in modo più schematico, rendendoli immediatamente comprensibili anche ai non addetti ai lavori. Le categorie di impatto possono essere divise in due grandi gruppi:

1) **le categorie di input**, ovvero gli impatti connessi con i materiali e le risorse utilizzati e consumati nello studio (LCA):

   - l'estrazione di risorse abiotiche (depositi quali combustibili fossili e minerali, risorse quali acque sotterranee, sabbia e ghiaia, risorse rinnovabili quali energia solare, vento e acque superficiali);
   - l'estrazione di risorse biotiche (legname, biomassa in genere);
   - l'uso del territorio (crescita dello sfruttamento del terreno, perdita di biodiversità, impegno di spazio fisico).

2) **le categorie di output**, che si riferiscono invece a quegli impatti causati dai rilasci nell'ambiente di varie sostanze e comprendono ad esempio:

   - l'effetto serra,
   - l'assottigliamento dello fascia di ozono,
   - la tossicità umana, l'ecotossicità (terrestre e acquatica),
   - la formazione di smog fotochimico,
   - l'acidificazione,
   - l'arricchimento in nutrienti (detto eutrofizzazione per il comparto acqua).

Una volta scelta una certa categoria di impatto, si deve anche scegliere l'indicatore con cui rappresentarla. A seconda del metodo scelto per la valutazione degli impatti si utilizzeranno, come spiegato di seguito, certe categorie piuttosto che altre e per tali categorie certi indicatori piuttosto che altri**.**

1) Effetto serra

L'effetto serra è un fenomeno naturale ed utile, che assicura il riscaldamento della terra fin dalle sue origini ed è legato alla presenza di alcuni gas atmosferici quali: l'anidride carbonica (CO_2), il metano (CH_4), l'ozono(O_3), il vapore acqueo (H_2O) e il protossido d'azoto (N_2O). Essi vengono

definiti “gas serra naturali”. La superficie terrestre assorbe la radiazione emessa dal Sole sotto forma di radiazioni a breve lunghezza d’onda (spettro del visibile) e ridistribuisce l’energia ricavata grazie alla circolazione atmosferica e oceanica. Questo flusso energetico viene bilanciato dalle radiazioni infrarosse a onde lunghe (infrarosso termico) che la Terra riemette verso lo spazio. Una porzione di questa radiazione infrarossa è tuttavia assorbita dai gas serra naturali presenti nell’atmosfera, provocando quel riscaldamento della superficie terrestre e dell’atmosfera conosciuto come “effetto serra naturale”, proprio come in una serra la temperatura tende conseguentemente a salire. Senza questa regolazione la temperatura media della superficie terrestre sarebbe di circa 33°C più bassa, ovvero pari a -18° contro i 15° attuali e la Terra sarebbe un pianeta freddo e inospitale. Negli ultimi anni, però, la presenza di questi gas serra nell’atmosfera è andata continuamente aumentando, principalmente a causa delle attività umane, e sono stati immessi nell’atmosfera anche gas serra di natura sintetica. Oggi, un crescente numero di osservazioni scientifiche fornisce il quadro che il pianeta si sta scaldando e considera una relazione stretta esistente tra l’incremento della concentrazione dei gas serra e l’aumento di temperatura del pianeta, e quindi che la maggior parte di questi cambiamenti climatici sia da attribuire all’uomo.
Il contributo di un certo gas all’effetto serra dipende da quattro fattori:
- le lunghezze d’onda alle quali il gas assorbe le radiazioni;
- la sua concentrazione nell’atmosfera;
- la sua capacità di assorbimento intrinseca;
- la sua eventuale interazione con altri gas atmosferici.

Per comparare gli impatti dovuti all’emissione di differenti gas serra, ad ogni sostanza è stato assegnato un potenziale di riscaldamento globale (GWP, Global Warming Potential), che esprime il rapporto tra l’assorbimento di radiazione infrarossa causata dall’emissione istantanea di 1 kg di tale sostanza e quello causato da una stessa emissione di anidride carbonica (sostanza presa come riferimento).
La formulazione dell’indice GWP più semplice e diffusa è basata sull’integrazione temporale della media globale del Forzante Radiativo RF di una emissione a impulso di 1 kg di composto confrontato con quella di 1 kg del gas di riferimento, vale a dire la CO_2, il cui calcolo è stato sviluppato nel primo rapporto del 1990 ed adottato per l’utilizzo nel Protocollo di Kyoto. Il GWP di un composto è dunque dato da:

$$GWP_i = \frac{\int_0^{TH} RF_i(t)\,dt}{\int_0^{TH} RF_r(t)\,dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i \cdot [C_i(t)]\,dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [C_i(t)]\,dt}$$

- RF (W/m^2) = Forzante Radiativo determinato a livello della tropopausa. Se non vi sono ulteriori specificazioni, RF si riferisce alla media globale. Nei report dell'IPCC il valore di RF per ciascun agente è spesso riportato come differenza di RF tra la data di uscita del rapporto e l'inizio dell'era industriale (1795). La definizione di Forzante Radiativo, perfezionata nei successivi tre rapporti, è la seguente: "Il forzante radiativo rappresenta il cambio netto di irradianza che si registra alla tropopausa, dopo che sia stato consentito alle temperature stratosferiche di riassestarsi al nuovo equilibrio radiativo e considerando la superficie, le temperature e le condizioni ambientali della troposfera costanti".

- TH Time Horizon, rappresenta l'orizzonte temporale sul quale è fondata l'analisi del GWP;

- ai = Efficienza radiativa, rappresenta la variazione di RF per ogni incremento unitario della concentrazione dell'agente i in atmosfera;

- Ci(t)= Concentrazione dell'agente, funzione del tempo.

La formula esposta fornisce il potenziale di riscaldamento globale assoluto dell'agente i rispetto all'agente di riferimento, che, come già detto, in tutti i rapporti dell'IPCC è assunto essere la CO_2.
In tabella 3 è riportato lo schema riassuntivo di tutti i gas serra più importanti, per ciascuno dei quali sono specificate persistenza (lifetime), efficienza radiativa e GWP, valutato su quattro orizzonti temporali (TH) differenti. Dai valori di GWP di ogni gas per ciascuna delle quattro opzioni si può notare l'influenza della scelta dell'orizzonte temporale sul valore di GWP.
L'indicatore per l'effetto serra è quindi espresso in kg di CO_2 equivalenti ed è pari a:

effetto serra = $\sum_i \mathbf{GWP}_i \times \mathbf{m}_i$ con

$\mathbf{GWP}_i$ = potenziale di riscaldamento globale della sostanza *i* (kg CO_2 eq. kg^{-1}),
$\mathbf{m}_i$ = massa di sostanza *i* rilasciata nell'ambiente (kg).
I potenziali di riscaldamento globale dipendono dal tempo di esposizione sul quale si effettua l'integrazione: l'IPCC ha compilato un elenco di valori dei GWP per differenti tempi di esposizione (20, 100 e 500 anni). Nella tabella 2 sono riportati alcuni dei potenziali di riscaldamento globale calcolati per un tempo di esposizione di 100 anni.

Inquinante	**GWP_{100} (kg CO_2 eq. kg^{-1})**
CO_2	1
CH_4	25
N_2O	298

TAB-2 POTENZIALI DI RISCALDAMENTO GLOBALE CALCOLATI PER UN TEMPO DI ESPOSIZIONE DI 100 ANNI (FONTE: IPPC, 2007)

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency (W m^{-2} ppb^{-1})	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR‡ (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO_2	See below[a]	[b]1.4×10^{-5}	1	1	1	1
Methane[c]	CH_4	12[c]	3.7×10^{-4}	21	72	25	7.6
Nitrous oxide	N_2O	114	3.03×10^{-3}	310	289	298	153
Substances controlled by the Montreal Protocol							
CFC-11	CCl_3F	45	0.25	3,800	6,730	4,750	1,620
CFC-12	CCl_2F_2	100	0.32	8,100	11,000	10,900	5,200
CFC-13	$CClF_3$	640	0.25		10,800	14,400	16,400
CFC-113	CCl_2FCClF_2	85	0.3	4,800	6,540	6,130	2,700
CFC-114	$CClF_2CClF_2$	300	0.31		8,040	10,000	8,730
CFC-115	$CClF_2CF_3$	1,700	0.18		5,310	7,370	9,990
Halon-1301	$CBrF_3$	65	0.32	5,400	8,480	7,140	2,760
Halon-1211	$CBrClF_2$	16	0.3		4,750	1,890	575
Halon-2402	$CBrF_2CBrF_2$	20	0.33		3,680	1,640	503
Carbon tetrachloride	CCl_4	26	0.13	1,400	2,700	1,400	435
Methyl bromide	CH_3Br	0.7	0.01		17	5	1
Methyl chloroform	CH_3CCl_3	5	0.06		506	146	45
HCFC-22	$CHClF_2$	12	0.2	1,500	5,160	1,810	549
HCFC-123	$CHCl_2CF_3$	1.3	0.14	90	273	77	24
HCFC-124	$CHClFCF_3$	5.8	0.22	470	2,070	609	185
HCFC-141b	CH_3CCl_2F	9.3	0.14		2,250	725	220
HCFC-142b	CH_3CClF_2	17.9	0.2	1,800	5,490	2,310	705
HCFC-225ca	$CHCl_2CF_2CF_3$	1.9	0.2		429	122	37
HCFC-225cb	$CHClFCF_2CClF_2$	5.8	0.32		2,030	595	181
Hydrofluorocarbons							
HFC-23	CHF_3	270	0.19	11,700	12,000	14,800	12,200
HFC-32	CH_2F_2	4.9	0.11	650	2,330	675	205
HFC-125	CHF_2CF_3	29	0.23	2,800	6,350	3,500	1,100
HFC-134a	CH_2FCF_3	14	0.16	1,300	3,830	1,430	435
HFC-143a	CH_3CF_3	52	0.13	3,800	5,890	4,470	1,590
HFC-152a	CH_3CHF_2	1.4	0.09	140	437	124	38
HFC-227ea	CF_3CHFCF_3	34.2	0.26	2,900	5,310	3,220	1,040
HFC-236fa	$CF_3CH_2CF_3$	240	0.28	6,300	8,100	9,810	7,660
HFC-245fa	$CHF_2CH_2CF_3$	7.6	0.28		3,380	1030	314
HFC-365mfc	$CH_3CF_2CH_2CF_3$	8.6	0.21		2,520	794	241
HFC-43-10mee	$CF_3CHFCHFCF_2CF_3$	15.9	0.4	1,300	4,140	1,640	500
Perfluorinated compounds							
Sulphur hexafluoride	SF_6	3,200	0.52	23,900	16,300	22,800	32,600
Nitrogen trifluoride	NF_3	740	0.21		12,300	17,200	20,700
PFC-14	CF_4	50,000	0.10	6,500	5,210	7,390	11,200
PFC-116	C_2F_6	10,000	0.26	9,200	8,630	12,200	18,200

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency (W m^{-2} ppb^{-1})	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR[‡] (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Perfluorinated compounds *(continued)*							
PFC-218	C_3F_8	2,600	0.26	7,000	6,310	8,830	12,500
PFC-318	$c\text{-}C_4F_8$	3,200	0.32	8,700	7,310	10,300	14,700
PFC-3-1-10	C_4F_{10}	2,600	0.33	7,000	6,330	8,860	12,500
PFC-4-1-12	C_5F_{12}	4,100	0.41		6,510	9,160	13,300
PFC-5-1-14	C_6F_{14}	3,200	0.49	7,400	6,600	9,300	13,300
PFC-9-1-18	$C_{10}F_{18}$	>1,000[d]	0.56		>5,500	>7,500	>9,500
trifluoromethyl sulphur pentafluoride	SF_5CF_3	800	0.57		13,200	17,700	21,200
Fluorinated ethers							
HFE-125	CHF_2OCF_3	136	0.44		13,800	14,900	8,490
HFE-134	CHF_2OCHF_2	26	0.45		12,200	6,320	1,960
HFE-143a	CH_3OCF_3	4.3	0.27		2,630	756	230
HCFE-235da2	$CHF_2OCHClCF_3$	2.6	0.38		1,230	350	106
HFE-245cb2	$CH_3OCF_2CHF_2$	5.1	0.32		2,440	708	215
HFE-245fa2	$CHF_2OCH_2CF_3$	4.9	0.31		2,280	659	200
HFE-254cb2	$CH_3OCF_2CHF_2$	2.6	0.28		1,260	359	109
HFE-347mcc3	$CH_3OCF_2CF_2CF_3$	5.2	0.34		1,980	575	175
HFE-347pcf2	$CHF_2CF_2OCH_2CF_3$	7.1	0.25		1,900	580	175
HFE-356pcc3	$CH_3OCF_2CF_2CHF_2$	0.33	0.93		386	110	33
HFE-449sl (HFE-7100)	$C_4F_9OCH_3$	3.8	0.31		1,040	297	90
HFE-569sf2 (HFE-7200)	$C_4F_9OC_2H_5$	0.77	0.3		207	59	18
HFE-43-10pccc124 (H-Galden 1040x)	$CHF_2OCF_2OC_2F_4OCHF_2$	6.3	1.37		6,320	1,870	569
HFE-236ca12 (HG-10)	$CHF_2OCF_2OCHF_2$	12.1	0.66		8,000	2,800	860
HFE-338pcc13 (HG-01)	$CHF_2OCF_2CF_2OCHF_2$	6.2	0.87		5,100	1,500	460
Perfluoropolyethers							
PFPMIE	$CF_3OCF(CF_3)CF_2OCF_2OCF_3$	800	0.65		7,620	10,300	12,400
Hydrocarbons and other compounds – Direct Effects							
Dimethylether	CH_3OCH_3	0.015	0.02		1	1	<<1
Methylene chloride	CH_2Cl_2	0.38	0.03		31	8.7	2.7
Methyl chloride	CH_3Cl	1.0	0.01		45	13	4

Notes:

[a] The CO_2 response function used in this report is based on the revised version of the Bern Carbon cycle model used in Chapter 10 of this report (Bern2.5CC; Joos et al. 2001) using a background CO_2 concentration value of 378 ppm. The decay of a pulse of CO_2 with time t is given by

$$a_0 + \sum_{i=1}^{3} a_i \cdot e^{-t/\tau_i}$$

Where $a_0 = 0.217$, $a_1 = 0.259$, $a_2 = 0.338$, $a_3 = 0.186$, $\tau_1 = 172.9$ years, $\tau_2 = 18.51$ years, and $\tau_3 = 1.186$ years.

[b] The radiative efficiency of CO_2 is calculated using the IPCC (1990) simplified expression as revised in the TAR, with an updated background concentration value of 378 ppm and a perturbation of +1 ppm (see Section 2.10.2).

[c] The perturbation lifetime for methane is 12 years as in the TAR (see also Section 7.4). The GWP for methane includes indirect effects from enhancements of ozone and stratospheric water vapour (see Section 2.10.3.1).

[d] Shine et al. (2005c), updated by the revised AGWP for CO_2. The assumed lifetime of 1,000 years is a lower limit.

[e] Hurley et al. (2005)

[f] Robson et al. (2006)

[g] Young et al. (2006)

TAB-3 SCHEMA RIASSUNTIVO DEI GAS SERRA

2) Tossicità nell'uomo

Questo tipo di effetto ambientale si riferisce alla tossicità che può colpire qualsiasi organismo vivente o ecosistema. Data la complessità e la vastità delle sue implicazioni si farà riferimento alla tossicità umana. Si tratta di associare gli effetti macroscopici dannosi a parametri di esposizione, facendo riferimento a un livello massimo tollerabile di rischio nei confronti di sostanze nocive, in genere cancerogene. L'indicatore di **tossicità umana** si riferisce agli effetti sulla salute umana di sostanze tossiche presenti nell'ambiente. Nella tabella 4 sono riportati i potenziali di tossicità umana calcolati con il metodo basato sul modello matematico "USES-LCA". Tali potenziali di tossicità sono stati calcolati in riferimento alla scala continentale (identificata con l'Europa Occidentale) e l'orizzonte temporale è un orizzonte temporale infinito. L'indicatore della tossicità umana è in questo caso espresso in kg di 1,4 diclorobenzene equivalenti come:

tossicità umana = $\sum_i \mathbf{HTP}_i \times \mathbf{m}_i$ con

$\mathbf{HTP}_i$ = potenziale di tossicità umana della sostanza *i* (kg 1,4-DCB eq. kg_{-1}),

$\mathbf{m}_i$ = massa di sostanza *i* rilasciata nell'atmosfera (kg).

Inquinante	HTP_∞ (kg 1,4-DCB eq. kg^{-1})	Inquinante	HTP_∞ (kg 1,4-DCB eq. kg^{-1})
Diossine (I-TEQ)	1,9E+09	HF	2,9E+03
Cr^{6+}	3,4E+06	Benzene	1,9E+03
IPA	5,7E+05	Cr^{3+}	6,5E+02
As	3,5E+05	Pb	4,7E+02
Cd	1,5E+05	Zn	1,0E+02
Se	4,8E+04	NO_x (come NO_2)	1,2E+00
Ni	3,5E+04	PM_{10}	8,2E-01
Cobalto	1,7E+04	HCl	5,0E-01
V	6,2E+03	H_2S	2,2E-01
Hg	6,0E+03	NH_3	1,0E-01
Cu	4,3E+03	SO_2	9,6E-02

TAB-4 POTENZIALI DI TOSSICITÀ UMANA CALCOLATI CON IL METODO BASATO SUL MODELLO USES-LCA (FONTE: FRISCHKNECHT ET AL., 2007)

3) Smog fotochimico

Lo smog fotochimico, è un particolare inquinamento dell'aria che si produce in giornate caratterizzate da condizioni meteorologiche di stabilità e di forte insolazione, in presenza di

abbonanti concentrazioni di ossidi di azoto e di composti organici volatili (VOC). Questi inquinanti emessi nell'atmosfera da molti processi naturali o antropogenici, innescano un complesso sistema di reazioni fotochimiche indotte dalla luce ultravioletta presente nei raggi del sole; portando alla Formazione di ozono (O_3), acido nitrico (HNO_3), perossiacetil nitrato (PAN), perossibenzoil nitrato (PBN), aldeidi e centinaia di altre sostanze. Tali inquinanti secondari vengono indicati col nome collettivo di smog fotochimico perché sono generati da reazioni chimiche catalizzate dalla luce e costituiscono la componente principale dello smog che affligge molte città ed aree industrializzate.
Il contributo di ogni singolo inquinante emesso alla formazione di ozono dipende dalla sua concentrazione nell'atmosfera, dalla velocità delle reazioni fotochimiche coinvolte e dalla reattività dell'inquinante stesso, ossia la sua propensione alla produzione di ozono. Per confrontare questi contributi, ad ogni sostanza viene assegnato un potenziale di formazione fotochimica di ozono (POCP, Photochemical Ozone Creation Potential), definito come il rapporto tra la variazione della concentrazione di ozono causata dall'emissione della sostanza in esame e la variazione della concentrazione di ozono causata dall'emissione della sostanza presa come riferimento, l'etilene (C_2H_4). L'indicatore della formazione fotochimica di ozono è quindi espresso in kg di C_2H_4 equivalenti come:

formazione fotochimica di ozono = $\sum_i \mathbf{POCP}_i \times \mathbf{m}_i$ con

$\mathbf{POCP}_i$ = potenziale di formazione fotochimica di ozono della sostanza *i* (kg C_2H_4 eq. kg^{-1}) e
$\mathbf{m}_i$ = massa di sostanza *i* rilasciata nell'atmosfera (kg).
I potenziali di formazione fotochimica di ozono riportati nella tabella 5 sono calcolati per alte concentrazioni di fondo di NO_x.

Inquinante	POCP (kg C_2H_4 eq. kg^{-1})	Inquinante	POCP (kg C_2H_4 eq. kg^{-1})
Etilene	1	Benzene	0,220
Toluene	0,637	Propano	0,176
Formaldeide	0,520	Etano	0,123
Eptano	0,494	NO_2	0,028
Esano	0,482	CO	0,027
COV NM	0,416	Metano	0,006
Pentano	0,395	NO	-0,427
Butano	0,352		

TAB-5 POTENZIALI DI FORMAZIONE FOTOCHIMICA DI OZONO CALCOLATI PER ALTE CONCENTRAZIONI DI FONDO DI NOX (FRISCHKNECHT ET AL., 2007)

4) Acidificazione

Con il termine di piogge acide si intende il processo di ricaduta dall'atmosfera di particelle, gas e precipitazioni acide. Se questa deposizione acida avviene sotto forma di precipitazioni (piogge, neve, nebbie, rugiade, ecc.) si parla di deposizione umida, in caso contrario il fenomeno
consiste in una deposizione secca. Le piogge acide sono causate essenzialmente dagli ossidi di zolfo (SOx) e, in parte minore, dagli ossidi d'azoto (NOx), presenti in atmosfera sia per cause naturali
che per effetto delle attività umane. La combustione di combustibili fossili, in particolare gli ossidi di zolfo e gli ossidi d'azoto, sono i principali responsabili del fenomeno delle piogge acide, che provoca l'abbassamento del pH di laghi, foreste e suolo, con gravi conseguenze per gli organismi viventi, gli ecosistemi ed i materiali. Per la quantificazione degli impatti provocati da tale fenomeno si impiegano fattori di caratterizzazione denominati potenziali di acidificazione (tabella 6) (AP, Acidification Potential) che convertono tutte le emissioni in kg di SO_2 equivalenti. L'indicatore dell'acidificazione risulta allora essere espresso in kg di SO_2 equivalente emessi:

acidificazione = $\sum_i \mathbf{AP}_i \times \mathbf{m}_i$ con

$\mathbf{AP}_i$ = potenziale di acidificazione della sostanza *i* (kg SO_2 eq. kg^{-1}) e

$\mathbf{m}_i$ = massa di sostanza *i* rilasciata nell'atmosfera (kg).

Risultato inventario		Fattore di caratterizzazione
SO_2	Anidride solforosa	1
SO_3	Anidride solforica	0.8
NO_2	Biossido d'azoto	0.7
NO	Monossido d'azoto	1.07
NO_x	Ossidi di azoto	0.7
HCl	Acido cloridrico	0.88
H_2SO_4	Acido solforico	0.65
HF	Acido fluoridrico	1.60
H_2S	Acido solfidrico	1.88
NH_3	Ammoniaca	1.88

TAB-6 POTENZIALI DI ACIDIFICAZIONE (SOURCE: DANISH TECHNICAL UNIVERSITY 1997)

5) Assottigliamento dell’ozono stratosferico

L'ozono, molecola triatomica di ossigeno (O_3), pur rappresentando meno di una parte per milione dei gas atmosferici, assorbe quasi interamente la radiazione ultravioletta proveniente dal Sole. Tale radiazione ha sufficiente energia per danneggiare molecole biologiche fondamentali quali il DNA, determinando un aumento di incidenza di fenomeni tumorali legati all’epidermide e di deficienze immunitarie, oltre che per generare danni generalizzati a tutta la biosfera.
L'ozono si forma continuamente in una fascia compresa tra i 25 e i 50 km di altezza al di sopra della superficie terrestre (ozonosfera), in seguito alla dissociazione di molecole di ossigeno (O_2) indotta dalla radiazione UV e al successivo urto di atomi isolati con altre molecole indissociate ($O + O_2$). A sua volta l'ozono, assorbendo la radiazione UV, si dissocia in $O_2 + O$, liberando energia. Fenomeni di turbolenza e movimenti verticali di aria trasferiscono l'ozono cosi formatosi a quote di 20-30 km, dove si raggiunge la massima concentrazione atmosferica dello "strato di ozono". Quest' ultima, tuttavia, non è fissa, ma varia in funzione della latitudine (è massima all'equatore e minima ai poli) e del tempo, in risposta alle stagioni. In inverno, quando l'atmosfera è più fredda e viene a mancare la radiazione UV, carburante per le reazioni che portano alla formazione di ozono, la fascia di massima concentrazione si abbassa; in estate al contrario si alza, raggiungendo quote di 30 km anche alle nostre latitudini. Da ciò si evince come lo schermo di ozono, sia, già di suo meno efficiente a livello polare che a livello equatoriale. L’ inquinamento prodotto da aerei che viaggiano a 10-15 km di quota, (clorofluorocarburi CFC e i HCFC, radicali liberi e cloruri) induce un assottigliamento del vulnerabile schermo ozonosferico polare, particolarmente evidente in Antartide. Il cloro in essi contenuto, infatti, liberandosi in stratosfera per effetto della radiazione UV, riduce la quantità di ozono accelerandone la trasformazione in ossigeno molecolare biatomico. L'efficienza della reazione è elevatissima, se si pensa che ogni atomo di cloro è in grado di distruggere fino a 100.000 molecole di ozono prima di essere inattivato o di fare ritorno in troposfera. In realtà non si tratta mai di una diminuzione continua né di una reale scomparsa, quanto piuttosto di un “circolo” che si amplia nei sei mesi primaverili e si restringe in quelli autunnali (Baldo et al., 2008). Il modello utilizzato è quello sviluppato dal WMO (*World Meteorological Organisation*, Organizzazione Meteorologica Mondiale): esso definisce il potenziale di esaurimento dell’ozono stratosferico di diversi gas, espressi tutti in kg CFC-11 equivalenti / kg emissione.

6) Eutrofizzazione

La crescita degli organismi viventi è naturalmente limitata dall'apporto di sostanze nutrienti essenziali quali l'azoto e il fosforo. Un rilascio di tali sostanze nell'ambiente riduce questa limitazione con un conseguente abbassamento della concentrazione di ossigeno e quindi con effetti negativi sull'intero ecosistema. L'uso agricolo di fertilizzanti e gli scarichi industriali e urbani,in genere ricchi in azoto e fosforo,sono le fonti principali di eutrofizzazione. Questo effetto deve essere considerato separatamente per i suoli e per le acque superficiali, poiché il comportamento della fauna e della flora è diverso nei due habitat. Nel caso di eutrofizzazione di acque superficiali, dove l'effetto più evidente è la crescita smisurata di alghe acquatiche, il conseguente consumo di ossigeno è la causa della diminuzione della quantità di ossigeno presente in acqua (Baldo et al., 2008). Il potenziale di nitrificazione (NP, *Nitrification potential*) è basato su una procedura stechiometrica e viene espresso come kg PO_4 equivalenti/ kg emissione.

7) Consumo di risorse: energia e materiali

I risultati dei consumi di energia e di materiali di un inventario di un ciclo di vita vengono comunemente forniti separatamente. Di solito si parla di consumo energetico diretto (espresso in MJ) e di consumo di materie prime necessarie allo svolgimento della stessa (espresso in Kg).Come nel caso egli effetti ambientali, anche per l'uso di risorse è necessario stabilire un indice che possa correlare gli effetti prodotti dai consumi che si generano in un determinato sistema produttivo con la situazione generale di disponibilità di risorse naturali; in questo modo potrà essere evidenziato l'effetto della diminuzione di tale disponibilità, mettendo il luce il problema della scarsità delle risorse stesse. Possiamo distinguere due tipi di risorse: quelle rinnovabili e quelle non rinnovabili. Appartengono alla prima categoria l'aria, la radiazione solare, e le risorse abiotiche, alla seconde le materie prime minerarie e il territorio. In generale il concetto di risorsa è strettamente correlato a quello di riserva: ovvero le risorse diventano riserve man mano che la conoscenza della loro disponibilità fisica e le condizioni economiche della loro utilizzazione diventano compatibili con il loro sfruttamento industriale. Dato che il grado di conoscenza geologica dei giacimenti minerari e le condizioni di fattibilità economica dell'estrazione variano nel tempo, esiste un confine dinamico tra risorse e riserve. Il consumo di risorse è quindi riferito all'idea che le riserve e le risorse non rinnovabili diminuiscono in seguito ad attività umane in modo tale che in futuro non possano più essere utilizzate come input nel sistema produttivo (Baldo et al., 2008). L'indicatore utilizzato è l'ADF (*Abiotic Depletion Factor*, fattore di esaurimento abiotico): esso viene determinato

basandosi sulla stima delle riserve disponibili per la risorsa considerate, nonché sul suo tasso di utilizzo.

8) Degrado del territorio e altri tipi di disturbo

La valutazione di questi ultimi due impatti di tipo locale completa il profilo ambientale del sistema indagato, si tratta del degrado del territorio e dei disturbi di tipo fisico, per in quali non è ancora prevista una standardizzazione come quella delle precedenti categorie. Per quanto riguarda il degrado del territorio, si considerano diversi tipi di effetti a seconda del parametro utilizzato per conferire un valore del'area in oggetto, che può essere rappresentato dalla qualità della vita nella zona interessata, oppure dal valore ambientale della zona, dalle implicazioni sociali ecc. Il deterioramento del suolo (erosione), il deterioramento della qualità del paesaggio, la distruzione degli ecosistemi e i rischi di incidente sono solo alcuni esempi di questi effetti. Per quanto riguarda i disturbi di tipo fisico, ricordiamo il rumore e i cattivi odori. Infine da notare come la valutazione di impatto ambientale (V.I.A.) sembra essere un ottimo strumento atto a fornire le conoscenze utili per approfondire queste categorie d'impatto (Baldo et al., 2008).

2.5 Metodi per la valutazione degli impatti

I software di supporto all'esecuzione della LCA disponibili sul mercato contengono già un elenco di categorie di impatto con i relativi indicatori e metodi di caratterizzazione. La scelta delle categorie d'impatto dipende molto dagli obiettivi dello studio di LCA e tiene conto anche chi leggerà i risultati: studiosi, gestori di impianti o i cittadini. Infine, alcuni Paesi, hanno i loro propri metodi che quindi converrà utilizzare qualora i risultati verranno mostrati proprio in quel Paese. Ciò che differenzia le possibili metodologie sono le procedure di scelta, di aggregazione e di ponderazione dei diversi indicatori che determinano l'indice finale. L'approccio migliore resta comunque quello di utilizzare più metodi e confrontare poi i risultati così ottenuti. Di seguito si riporta una breve descrizione dei principali metodi che vengono utilizzati negli studi di LCA per svolgere la fase di valutazione degli impatti.

1) "Eco-indicator 95": è stato sviluppato nei Paesi Bassi nell'ambito di un programma di ricerca promosso dalla PRé Consultants del quale hanno fatto parte famose multinazionali (Philips, Volvo) ed istituzioni pubbliche. Il progetto è stato poi aggiornato in "**Eco-indicator 99**" e propone

l'inclusione di procedure di normalizzazione e di pesatura, permettendo di giungere al calcolo di un unico valore quantificabile dell'impatto totale sull'ambiente. In particolare, prima della fase di normalizzazione, vengono valutati i contributi delle diverse categorie di impatto a tre grandi categorie di danno: la salute umana, la qualità degli ecosistemi ed il consumo di risorse. I fattori di caratterizzazione delle categorie di impatto ambientale sono stati specificatamente pensati in funzione della successiva fase di normalizzazione e pesatura.
2) "CML 1992": è stato sviluppato dalla Leiden University di Amsterdam nel 1992. Un suo aggiornamento ha portato al metodo "**CML 2001**", che focalizza l'attenzione sulle categorie di impatto ambientale che sono: il consumo di risorse abiotiche, i cambiamenti climatici (effetto serra), l'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico, la tossicità umana, l'ecotossicità, la formazione fotochimica di ozono, l'acidificazione e l'eutrofizzazione.
3) "ReCiPe": è stato sviluppato a partire dall'Eco-indicator 99 e dal CML 2001. Prevede sia un approccio midpoint con 16 categorie di impatto che un approccio endpoint con 3 categorie di danno.
4) "EPS 2000": è nato dalla collaborazione tra l'Istituto di ricerche ambientali svedese e alcune grandi industrie. Il metodo è classificabile tra quelli che prevedono un approccio economico: nella fase di pesatura fa, infatti, riferimento a quanto sarebbe necessario spendere per mantenere inalterata la situazione ambientale o ripristinare quella esistente prima degli effetti ambientali generati dal processo produttivo. Le categorie di impatto analizzate fanno riferimento a cinque grandi aree di salvaguardia: salute umana, ecosistemi naturali, disponibilità di risorse abiotiche, biodiversità e difesa dei valori culturali e del tempo libero.
5) "Ecopoints 97": è un aggiornamento del metodo Ecopoint sviluppato in Svizzera nel 1990. In questo metodo la determinazione dei pesi delle categorie di impatto è basata sulla differenza tra il carico ambientale corrente ed un livello limite, derivato dai limiti imposti dalla legge nazionale svizzera. Ecopoints 97 è molto popolare in Svizzera, forse grazie alla sua semplicità. Da questo metodo è derivato il nuovo metodo "Ecological scarcity 2006".
7) "IMPACT 2002+": è stato sviluppato in Svizzera. Ogni categoria di impatto è espressa sia con un indicatore midpoint che con un indicatore endpoint.
In Simapro sono disponibili questi metodi appena elencati, integrati anche ad altri: ma di seguito ne vengono descritti dettagliatamente quelli più importanti: Greenhouse Gas Protocol, Eco-indicator99, Ecological Footprint (EF), Carbon Footprint (CF), Water Footprint (WF) e Cumulative Energy Demand (C.E.D.). Quattro di questi saranno utilizzati nel presente lavoro.

2.5.1 Greenhouse Gas Protocol

Il metodo Greenhouse Gas Protocol è un aggiornamento del precedente metodo del' IPCC 2007, perché utilizza gli stessi fattori di caratterizzazione dell'IPCC GWP100 del 2007. Si tratta di uno strumento nato dalla collaborazione tra World Resources Institute e il World Business Council for Sustainablen Development a disposizione delle imprese e dei governi per sviluppare completi e affidabili inventari delle loro emissioni di gas serra. I quantitativi di gas serra vengono normalmente espressi in kgCO2-eq, attraverso un'operazione di standardizzazione basata sui potenziali di riscaldamento globale (GWP, Global Warming Potential). I potenziali di riscaldamento globale (GWP), come detto in precedenza, sono calcolati per ciascun gas serra tenendo conto della sua capacità di assorbimento delle radiazioni e del tempo della sua permanenza nell'atmosfera. Infatti il potenziale di riscaldamento globale (GWP) è la misura di quanto un dato gas serra contribuisce all'effetto serra**.** Questo nuovo indicatore però presenta una variante rispetto all' IPCC 2007 ovvero che i valori di kg di CO_2 sono divisi in quattro categorie:

- carbonio proveniente da combustibili fossili;
- carbonio proveniente da fonti biogeniche come piante e alberi;
- carbonio proveniente da trasformazioni del territorio, ovvero gli impatti diretti;
- assorbimento di carbonio dalle piante ed dagli alberi in fase di crescita.

2.5.2 Ecoindicator 99

L"Eco-indicator" si autodefinisce un metodo di pesatura e valutazione degli effetti ambientali che danneggiano gli ecosistemi o la salute umana su scala europea, proponendosi come strumento di semplice utilizzo per la valutazione delle diverse opzioni che possono presentarsi durante l'analisi di un prodotto/processo definito. Il progetto "Eco-indicator" a partire dalla versione introdotta nel 1995 propone, come detto in precedenza, l'inclusione nella metodologia LCA di procedure di normalizzazione basate su un metodo di pesatura. Questo permette di pervenire al calcolo di un unico valore quantificabile dell'impatto totale sull'ambiente, l'ecoindicatore appunto.

Basandosi su una serie di LCA svolte sui materiali e processi comuni, gli autori forniscono un set di ecoindicatori in grado di stabilire una prima valutazione dell'impatto del prodotto o del servizio oggetto dell'indagine o del progetto: maggiore è il valore dell'ecoindicatore, maggiore è l'impatto ambientale potenziale. Per quanto riguarda gli effetti ambientali considerati, il metodo tiene conto di quelli che si ritiene danneggino l'ecosistema o la salute umana a scala planetaria e regionale: effetto serra, distruzione strato di ozono, acidificazione, eutrofizzazione, smog e sostanze tossiche

(metalli pesanti, sostanze cancerogene, pesticidi).

Non sono invece considerate: le sostanze tossiche che rappresentano un problema sui luoghi di lavoro, il consumo di materie prime, i rifiuti. Di seguito è riportata, in figura 2 uno schema esplicativo del metodo.

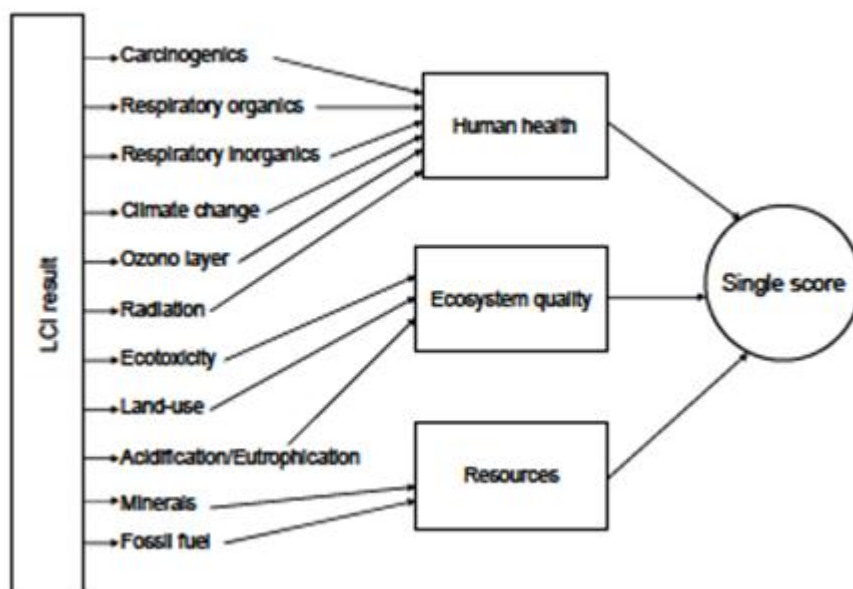



FIG-2 FASI DELLA VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI CON IL METODO ECOINDICATOR 99

La fase di normalizzazione merita un breve approfondimento: Eco-indicator definisce un valore di riferimento come il contributo medio annuo di un determinato impatto ambientale imputabile a un abitante in Europa; ne consegue che gli impatti risultano, confrontabili in termini di abitante equivalente, per cui è possibile valutare relativamente a ogni singolo effetto ambientale l'entità dell'impatto iniziale. Tuttavia, tale primo risultato non ci dice nulla su quale debba essere l'importanza relativa dei diversi effetti ambientali, poiché bisogna definire un corretto livello di confronto in quanto differenti effetti ambientali causano differenti tipi di danno.

Per risolvere questo problema devono essere stabiliti opportuni fattori di pesatura che consentano il confronto della gravità dei diversi impatti potenziali normalizzati su una stessa scala di riferimento (Eco-Indicator Points). In pratica si determina una correlazione che consente di determinare livelli di danno equivalente per i diversi effetti ambientali. Per calcolare il risultato totale e univoco dell'impatto ambientale del processo in esame non resta che definire l'Eco-indicator come la somma degli Eco-indicator Points calcolati per i calcolati per i singoli impatti. Il punto debole di tutta la metodologia risiede chiaramente nella definizione dei fattori utilizzati per la pesatura degli impatti. Eco-indicator utilizza per il calcolo dei coefficienti di pesatura il criterio del Distance to

Target per cui l'ipotesi di base è che esista una correlazione tra la gravità di un determinato effetto e la distanza tra il livello attuale e un livello obiettivo. Visti i limiti presenti nel metodo Eco-indicator '95, si è preceduto a una rielaborazione della struttura, che ha portato alla stesura di Eco-indicator '99. Il cambiamento fondamentale consiste nel ricorso a un approccio di tipo top-down. Ovvero quella che in Eco-indicator '95 era la fase finale del procedimento, cioè la pesatura dei risultati, in Eco-indicator '99 è il primo problema affrontato. Gli effetti negativi sull'ambiente vengono raggruppante in tre macrocategorie: Human Health, Ecosistem Quality e Resources come indicato in figura 2 (Baldo et al., 2008). La categoria di danno Human Health considera i danni alla salute umana, quali malattie, morti premature o inalabilità provocate da cause riconducibili all'ambiente.
In particolare vengono analizzati:

- Danni causati da sostanze cancerogene;
- Danni causati da sostanze organiche alle vie respiratorie;
- Danni causati da sostanze inorganiche alle vie respiratorie;
- Danni causati dai cambiamenti climatici;
- Danni causati dalle radiazioni ionizzanti;
- Danni causati dall'assottigliamento dello strato d'ozono.

Il danno è quantificato in DALY (Murray, 1996), Disability-Adjusted Life Years, ovvero il peso di una infermità dovuta ad una invalidità o a una morte prematura attribuibili alla malattia causata.
Per la categoria di danno Ecosystem Quality vengono considerati tre tipi di impatto:

3) l'uso del suolo (land-use);
4) le emissioni tossiche (ecotoxicity);
5) eutrofizzazione e acidificazione.

L'unità di misura in questo caso è il PDF$\cdot$m$^2\cdot$yr (Potentially Disappeared Fraction) per le categorie di impatto Acidification/Eutrophication e Land use mentre l'unità di misura PAF$\cdot$m$^2\cdot$yr (Potentially Affected Fraction) è associata alla categoria di impatto Ecotoxicity. La variazione del numero di specie vegetali presenti in un territorio viene considerata come l'indicatore biologico della salute dell'ecosistema e quindi l'unità di misura associata rappresenta la diminuzione relativa – disappeared - o il danneggiamento relativo - affected - del numero di specie espresso sotto forma di frazione moltiplicati all'area sulla quale questi sono rilevati ed al periodo di misurazione. La diminuzione del numero di specie è rappresentata dal P.D.F. e può essere interpretato come la frazione di specie che hanno un'alta probabilità di non sopravvivere nell'area considerata, a causa delle condizioni di vita sfavorevoli.

Per quanto riguarda l'ultima categoria: Resources, vengono considerati gli impatti dovuti all'estrazione e allo sfruttamento delle risorse minerali e dei combustibili fossili.
In questo caso l'unità di misura è il MJ Surplus, che rappresenta la differenza fra l'energia necessaria attualmente e quella necessaria nel futuro all'estrazione di un'unità di risorsa e quella indispensabile in un istante futuro. Viene quindi calcolato il surplus di energia, in MJ, che sarà necessario all'estrazione di un kg di materiale nel momento in cui il consumo di quel materiale sarà cinque volte quello estratto dall'umanità prima del 1990. La scelta di un fattore N=5 è totalmente arbitraria, ma valida perché comunque l'obiettivo è quello di misurazioni relative. Stabilito il fattore di danno associato ad ogni sostanza emessa o risorsa utilizzata, questo viene moltiplicato per la quantità di sostanza per ottenere un valore di danno complessivo relativo ad una specifica categoria di impatto. Allo scopo di confrontare le diverse categorie di danno, i valori ottenuti vengono sottoposti ad un processo di normalizzazione che permette, rapportando tutto ad un unico valore di riferimento, di rendere omogenei i dati trovati nella fase di caratterizzazione e quindi confrontabili tra di loro. In seguito la fase di valutazione permette infine di esprimere l'impatto associato al prodotto attraverso un indice ambientale finale. I valori degli effetti normalizzati vengono moltiplicati per opportuni fattori di peso che rappresentano l'importanza relativa delle diverse categorie di danno e sommati in modo da ottenere un unico valore, l'Eco-indicatore (espresso in eco-punti) che quantifica l'impatto complessivo associato al prodotto.
Sono presenti tre diverse versioni dell'Ecoindicator 99, ognuna delle quali consente valutazioni di sfumature diverse, caratterizzate da ipotesi e assunzioni diverse, a seconda delle caratteristiche della L.C.A., dei suoi obiettivi e delle convinzioni dell'utente che la realizza. Per definire questo “modo di pensare” si è fatto uso della Cultural Theory (Thompson M., 1990), che considera i comportamenti delle persone rispetto a due dimensioni dell'esistenza umana: l'attaccamento al gruppo ed il grado di indipendenza nei confronti di imposizioni e prescrizioni esterne. Da questi differenti combinazioni delle due dimensioni consideratesi ottiene uno stile di vita, che influisce sulle scelte e sul sistema di valori di ciascun individuo e del gruppo a cui appartiene. Ne conseguono cinque archetipi di persona:
- Individualista (Individualist): è una persona libera da qualsiasi legame; nella sua visione, tutto è provvisorio e soggetto a negoziazione;
- Egualitario (Egalitarian): possiede un forte attaccamento al gruppo, ma non alle sue imposizioni; non riconoscendo differenze di ruolo, rende ambigue le relazioni all'interno del gruppo scatenando spesso conflitti;
- Gerarchico (Hierarchist): è un soggetto che possiede forti legami sia con il gruppo sia con le sue regole; crea una forte stabilità, favorendo azioni di controllo su di sé e sugli altri;

- Fatalista (Fatalist): dipende profondamente dalle prescrizioni, ma non sente l'appartenenza al gruppo, perciò agisce singolarmente;
- Autonomo (Autonomist): appartiene ad una minoranza che rifiuta l'influenza del gruppo e di tutte le sue prescrizioni.

A questo punto risulta evidente che le prime tre tipologie di persone fondano le proprie scelte su valide prospettive, al contrario delle ultime due, le quali, per questo motivo, non vengono considerate nel modello. In quanto il fatalista tende a non avere opinioni proprie, ma ad uniformarsi al giudizio degli altri, mentre l'autonomo ha un pensiero completamente sfuggente a qualsiasi tipo di modellizzazione. Perciò queste due tipologie di approccio risultano poco adatte a una modellizzazione Eco-indicator 99 che considera solo i tre archetipi individualista, egualitario e gerarchico. I comportamenti e le opinioni alla base dei tre sistemi di valori utilizzati in Eco-indicator 99 sono sintetizzati in tabella 7.

Aspetto	UGUALITARIA	INDIVIDUALISTA	GERARCHICA
Criterio guida	Argomentazioni	Esperienza	Evidenza
Stile nelle scelte	Prevenzione	Adattamento	Controllo
Distribuzione delle risorse	Paritaria	Prioritaria	Proporzionale
Percezione del tempo	Lungo periodo	Breve periodo	Bilanciamento lungo-breve periodo
Responsabilità verso le generazioni future	Presente < Futuro	Presente > Futuro	Presente = futuro
Visione delle risorse	Verso esaurimento	Abbondanti	Scarse
Percezione del rapporto fabbisogno-risorse	Gestione del fabbisogno ma non delle risorse	Gestione delle risorse e del fabbisogno	Gestione delle risorse ma non del fabbisogno
Atteggiamento verso la natura	Attenzione	Laissez-faire	Regolamentazione
Atteggiamento verso l'uomo	Costruzione di una società egalitaria	Channel rather change	Restrizione del comportamento
Percezione del rischio	Avversione al rischio	Ricerca del rischio	Accettazione del rischio

TAB-7 PROSPETTIVE CULTURALI DI ECOINDICATOR 99

La classificazione e la valutazione dei tre archetipi hanno forti implicazioni sulla metodologia; l'effetto più evidente è che non si ha un unico modello, ma tre distinte versioni dello stesso modello: Eco-indicator 99 (E), Eco-indicator 99 (I) ed Eco-indicator 99 (H). Come conseguenza di ciò il metodo non ha un solo valore in uscita, ma tre differenti valori dipendenti dalla prospettiva prescelta. Questo potrebbe sembrare un ostacolo per l'utilizzatore del metodo mentre, in realtà, riflette il fatto che il giudizio su problemi ambientali risente della prospettiva culturale entro la quale è esplicitato. Presentando tre diverse prospettive, ciascuno è libero di scegliere quella che ritiene più adeguata allo scopo ed eventualmente può calcolare una media dei tre diversi valori

ottenuti, media che potrebbe anche essere pesata considerando la distribuzione della popolazione europea nei confronti delle tre diverse prospettive. Per facilitare i procedimento di pesatura degli effetti si ricorre spesso al metodo del triangolo (*triangle method*, fig. 3). Il triangolo è utile a rappresentare contemporaneamente le tre categorie di effetti e il loro peso relativo. Infatti sul triangolo possono essere tracciate delle linee di indifferenza, vale a dire le linee lungo le quali l'importanza di uno dei tre danni rimane costante, tra i diversi effetti, che indicano, in percentuale, il diverso peso dei tre differenti effetti ritenuto indifferente. Sui tre lati sono rappresentate le tre macrocategorie di impatto (ovvero le tre categorie di danno) secondo una percentuale di importanza crescente in senso orario. Ciascun punto, individuato grazie alle linee di indifferenza, compreso nel triangolo rappresenta quindi una somma pesata delle importanze relative delle tre macrocategorie. ai tre vertici si ottiene il peso massimo di ciascuna macrocategoria e peso nullo per le altre due, mentre sui tre lati saranno presenti tutti i casi con peso nullo per una delle tre macrocategorie. Il totale dei pesi attribuiti darà, per definizione, il 100%. La figura 3 riporta inoltre la collocazione delle tre prospettive culturali nel triangolo, dove il punto nero indica la posizione Gerarchica, il rosso quella Ugualitaria ed il blu quella Individualista.

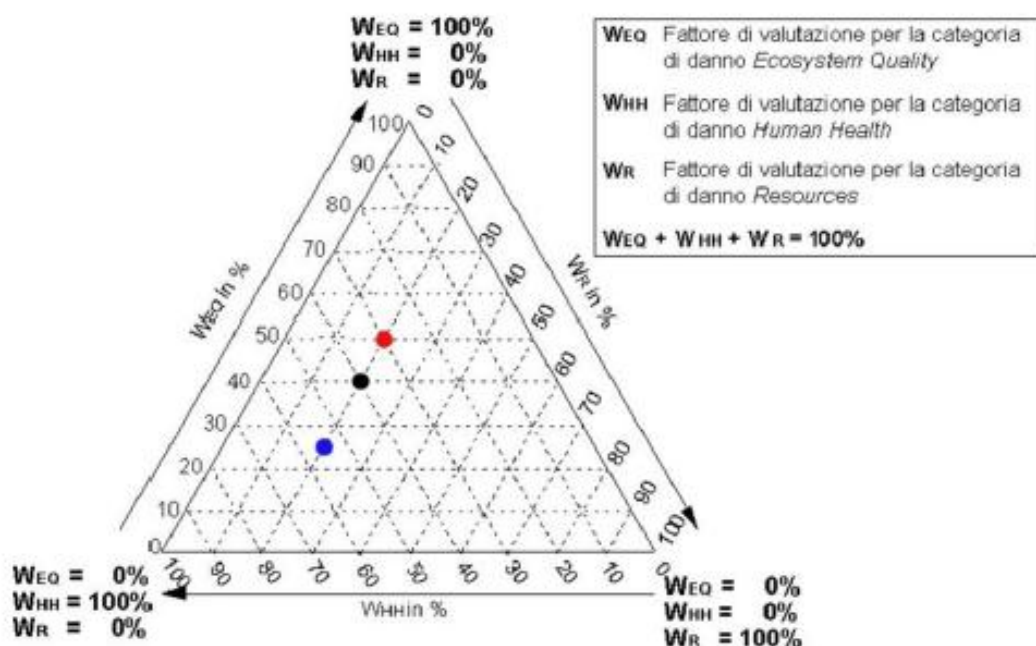



FIG-3 COLLOCAZIONE NEL TRIANGOLO DELLE TRE PROSPETTIVE CULTURALI (NERO-GERARCHICA,ROSSO-UGUALITARIA, BLU-INDIVIDUALISTA); FONTE: WWW.PRE.NL

Per quel che riguarda i contributi delle diverse categorie di impatto relative alle tre categorie di danno nelle tre differenti prospettive culturali, si può affermare che:

- Nella prospettiva gerarchica, le categorie di impatto Land-use, Climate Change e Fossil fuels sono le più importanti;

- Nella prospettiva ugualitaria è molto accentuata l'importanza del Land-use, rispetto ad Acidification/ Eutrophication ed Ecotoxicity;
- Nella prospettiva individualista è dominante Respiratory effects (inorganics), mentre l'impatto Carcinogenic effects risulta di minore importanza.

Di seguito una tabella (tabella 8) che sintetizza quello detto fino ad esso.

	Categoria di impatto	Fattore di caratterizzazione	Fattore di normalizzazione			Fattore di valutazione (pt)		
			E	I	H	E	I	H
Human Health	Carcinogens	DALY/kg	64,7 $DALY^{-1}$	121 $DALY^{-1}$	65,1 $DALY^{-1}$	300	550	400
	Respiratory inorganics							
	Respiratory organics							
	Climate change							
	Ozone layer							
	Radiation							
Ecosystem Quality	Ecotoxicity	$PAFm^2Yr/kg$ = 0.1 $PDFm^2Yr/kg$	$1,95 \cdot 10^{-4}$ $(PDF \cdot m^2Yr)^{-1}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$ $(PDF \cdot m^2Yr)^{-1}$	$1,95 \cdot 10^{-4}$ $(PDF \cdot m^2Yr)^{-1}$	500	250	400
	Acidification/ Eutrophication	$PDFm^2Yr/kg$						
	Land use	$PDFm^2Yr/kg$						
Resources	Minerals	MJ·Surplus/kg	$1,68 \cdot 10^{-4}$ $(MJ \cdot Surplus)^{-1}$	$6,68 \cdot 10^{-3}$ $(MJ \cdot Surplus)^{-1}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$ $(MJ \cdot Surplus)^{-1}$	200	200	200
	Fossil fuels							

TAB-8 CATEGORIE DI IMPATTO E DI DANNO E FATTORI DI NORMALIZZAZIONE E VALUTAZIONE NELLE TRE PROSPETTIVE DI ECO-INDICATOR 99; FONTE: SIMAPRO 7

Viene raccomandato l'impiego della versione gerarchica perché risulta essere la più conforme con gli altri metodi di valutazione. Le altre due prospettive possono essere usate per conferire più forza e sensibilità all'analisi.

2.5.3 Ecological Footprint (EF)

L'impronta ecologica è definita come la misura della superficie biologicamente produttiva di mare e di terra richiesta per produrre le risorse consumate e per assorbire parte dei rifiuti generati dal consumo di combustibili fossili di una popolazione. L'EF è un indicatore composito che unisce il BLF, CF (sinonimo di domanda di assorbimento di carbonio per un terrenoFGF, FLF, GLF e CLF.L'EF è ampiamente utilizzato come indicatore per misurare la sostenibilità ambientale. Esso fornisce un valutazione aggregata di molteplici pressioni antropiche. La forza principale del concetto EF è che è attraente e intuitivo, e che la sua metodologia è in continuo miglioramento.

Tuttavia, va notato che la EF misura solo un aspetto importante della sostenibilità, vale a dire, l'aspetto ambientale, e non tutte le problematiche ambientali. L'EF esclude gli indicatori economici o sociali ed è di solito misurato in unità di superficie a livello mondiale ovvero come la quantità di spazio bio-produttivo. Per generare l'impronta relativa ad un insieme di consumi si mette in relazione la quantità di ogni bene consumato con una costante di rendimento espressa in kg/ha. Il risultato è una superficie. Huijbregts et al. (2008) hanno approfondito l'impronta ecologica utilizzata dalla banca dati Ecoinvent come ecoindicatore di valutazione delle LCA. Ogni ettaro globale rappresenta la frazione totale bio-produttiva della Terra ed è definito come uno ettaro di terreno o di acqua normalizzato in tutto il mondo e mediato su tutti i terreni e gli specchi d'acqua biologicamente produttivi, in un determinato anno. L'area totale biologicamente produttiva disponibile sulla Terra è di circa 12.000 Mha. Le aree biologicamente produttive includono i terreni agricoli, foreste e zone di pesca, ma escludere i deserti, ghiacciai, o il mare aperto (Lidija Čuček et al, 2012).

Traducendo l'EF attraverso una relazione analitica possiamo affermare che l'impronta ecologica di un prodotto è definita come la somma integrata nel tempo di ogni occupazione del suolo, diretta (EFd) ed indiretta (EFn), e della superficie necessaria all'assorbimento delle emissioni legate ai combustibili fossili ed al cemento utilizzati dal processo di produzione ($EFCO_2$):

$$EF = EF_d + EF_{CO_2} + EF_n$$

Nei prodotti del database Ecoinvent, l'occupazione del suolo diretta, espressa in m^2a, è definita dall'area edificata, di foresta, di coltivazione, di pascolo e di destinazione idroelettrica. L'impronta ecologica diretta, destinata a queste cinque tipologie di destinazione, è calcolata come segue:

$$EF_{diretta} = \sum_i A_i \cdot EqF_i$$

Dove Ai è l'occupazione di area a destinazione d'uso iesima (m^2a), mentre EqFi è il fattore di equivalenza relativo alla destinazione d'uso iesima. I fattori di equivalenza normalizzano ciascun tipo di occupazione del suolo del database Ecoinvent secondo la sua bioproduttività.

In generale le terre molto produttive come le coltivazioni, ma anche il costruito, sono caratterizzate da un elevato fattore EqF, al contrario di quanto avviene per le terre destinate al pascolo, considerate poco produttive. La EF_{CO2} stima l'area biologicamente produttiva addizionale richiesta per sequestrare, attraverso la riforestazione, la CO_2 atmosferica legata all'utilizzo dei combustibili fossili e quella proveniente dalla produzione del cemento:

$$EF_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot \frac{1-F_{CO_2}}{S_{CO_2}} \cdot EqF_f$$

dove M_{CO2}è l'emissione specifica di CO_2 in kg per unità di prodotto, F_{CO2} è la frazione di CO_2 assorbita dagli oceani, S_{CO2} è quella rimossa dalla biomassa ($kgCO^2m\text{-}^2a\text{-}^1$) e EqF è il fattore di equivalenza per la tipologia di uso del suolo "foresta". Il risultato è di circa 2,7 m^2a per ogni kg di CO_2 emessa. La EF nucleare infine è calcolata come se fosse una forma di energia fossile:

$$EF_n = E_n \cdot I_{CO_2} \cdot \frac{1-F_{CO_2}}{S_{CO_2}} \cdot EqF_f$$

dove En è l'utilizzo specifico di energia in MJ derivata da fonti nucleari spesa per una unità di prodotto ed I_{CO2} è l'intensità di emissione di CO_2 media per unità di combustibile fossile, espressa in kg $CO_2MJ\text{-}^1$. Il risultato di tale operazione è pari a 0,2 m^2a ogni MJ di energia primaria nucleare consumato. Convertire i dati in unità di area può essere problematico. Le limitazioni includono anche la disponibilità dei dati, l'incertezza dei dati, e specificità geografica. L'obiettivo del'EF può essere applicato su scale che vanno da scale più piccole come le famiglie o le città a scale più grosse come regioni, paesi o l'umanità nel suo complesso, ma è più efficace, significativa e robusta a livello aggregato (Lidija Čuček et al, 2012).

2.5.4 Carbon Footprint (CF)

Nel corso degli ultimi anni, il CF è diventato uno dei più importanti indicatori per la protezione degli aspetti ambientali. Il Carbon Footprint sta di solito per la quantità di gas dovuta all'effetto serra (CO_2 e altri gas a effetto serra) emessa durante un ciclo di vita completo di un processo o di prodotto. Il CF è quantificato utilizzando indicatori quali il GWP (CE, 2007), che come detto in precedenza rappresenta le quantità di gas che contribuisce al riscaldamento globale e al cambiamento climatico, utilizzando di solito un orizzonte temporale specifico di 100 anni (IPPC, 2009). La definizione base del CF è che il Carbon Footprint rappresenta l'area di terreno necessaria per il sequestro delle emissioni di CO_2 derivate da combustibili fossili attraverso imboschimento. Wright et al. (2011) suggerisce che solo due gas a base di carbonio (CO_2 e CH_4), data la facilità di recupero di dati, devono essere utilizzati nella determinazione di una CF. Esso comprende soprattutto le attività degli individui, delle popolazioni, dei governi, delle aziende, delle organizzazioni, dei processi, dei settori industriali, ecc. (Lidija Čuček et al, 2012).

Sono stati suggeriti e / o utilizzati anche altri termini diversi in materia di emissioni di gas serra, come ad esempio:

- l'impronta climatica ,
- impronta di CO_2,
- l’impronta GHG,
- l'impronta di metano,
- GWP footprint.

2.5.5 Water Footprint (WF)

La WF è strettamente legata al concetto di acqua virtuale e rappresenta il volume totale di acqua dolce diretta e indiretta utilizzata, consumata, e / o inquinata. Una WF consiste in una impronta delle acque di colore blu, verde, e grigia, che rappresenta, rispettivamente, il consumo di acque superficiali e sotterranee, il consumo di acqua piovana e il volume di acqua necessaria per diluire gli inquinanti agli standard di qualità delle acque.
Un Footprint Blu (BWF), perciò, è una misurazione dell'impatto, associata all’utilizzo dell'acqua da parte degli individui e dalle società, sulle risorse mondiali di acqua dolce. Il BWF tiene conto sia del consumo di acqua (quantità d'acqua), sia dello stress delle risorse (l'indice di stress idrico) e sia della qualità (indice dell’impatto dell’acqua) ed è espressa in unità volumetriche equivalenti. L'impronta relativa all’inquinamento delle acque (WPF), invece rappresenta la quantità di sostanze emesse in acqua. Il WF perciò è un metodo per quantificare l'utilizzo di acqua per un prodotto, per ogni gruppo ben definito di consumatori (ad esempio, un individuo, città, provincia, stato o nazione) o di produttori (ad esempio, un ente pubblico, imprese private, o settore economico). La forza del concetto del WF è che esso fornisce un'ampia prospettiva sul gestione delle acque del sistema e permette una più profonda comprensione del consumo d'acqua, integrando l'utilizzo di acqua consumata e inquinata per unità di tempo o unità funzionale.
I punti deboli del WF sono: in primo luogo che essa rappresenta solo la quantità di acqua utilizzata senza stima degli impatti ambientali correlati, in secondo luogo che la stima della WF grigia è soggettiva, e infine che non sono disponibili studi che riguardano l’incertezza anche se l'incertezza, alcune volte, può essere davvero significativa (Lidija Čuček et al, 2012).

2.5.6 Cumulative Energy Demand (C.E.D.)

La Cumulative Energy Demand quantifica la parte di energia sottratta alla natura e immagazzinata nella formazione di un prodotto, espressa in MJ. E' stata sviluppata da Boustead &Hancock nel 1979, ed è un metodo che permette di valutare i consumi energetici di un processo produttivo focalizzandosi sull'analisi dell'impiego delle risorse energetiche così suddivise:

- energia non rinnovabile, fossile;
- energia non rinnovabile, nucleare;
- energia rinnovabile, biomasse;
- energia rinnovabile, eolica, geotermica e solare;
- energia rinnovabile, idroelettrica.

Viene calcolata così sia l'energia diretta, ovvero quella impegnata in processo produttivo, sia quella indiretta cioè la quota parte di energia stoccata nel prodotto e pronta per essere consumata.
Poiché questo indicatore è legato solo sui carichi energetici delle diverse operazioni coinvolte nel sistema produttivo da solo non può fornire un quadro esaustivo dell'effettivo carico ambientale di un sistema produttivo. Perciò il metodo va affiancato ad altri sistemi di valutazione che comprendono le categorie d'impatto e di altri effetti ambientali e i relativi fattori di caratterizzazione.

2.6 LCA in edilizia

2.6.1 Introduzione

Il settore delle costruzioni gioca un ruolo importante nel fabbisogno umano, come per esempio la fornitura di abitazioni, di ospedali e di infrastrutture per il trasporto. In tutto questo sono incluse le spese per l'intensivo utilizzo delle risorse minerarie ed energetiche come così come la produzione di rifiuti. Ad esempio, nel Regno Unito oltre 200 milioni di tonnellate all'anno di minerali vengono estratti e consumati in ciascun settore; essi rappresentano l'84% dell'estrazione mineraria annuale del paese. Inoltre, il settore residenziale consuma circa 500 milioni di MWh / anno di energia con un contribuito di circa 158 milioni di tonnellate di CO_2 eq. / anno, pari al 28% delle emissioni annue di carbonio in Italia e produce oltre 100 milioni di tonnellate di rifiuti ogni anno (pari al 33% ogni anno). Come risultato, il settore delle costruzioni contribuisce in modo significativo ai diversi impatti ambientali, compresi quelli globali (Rosa M. Cuéllar-Franca, et al., 2012). L'elevata evoluzione continua delle performance energetica dei componenti dell'edilizia rende quello delle costruzioni tra i campi di applicazione della LCA. potenzialmente più interessanti. Esso è uno strumento molto utile alla caratterizzazione di un sistema complesso sia dal punto di vista degli impatti ambientali che genera, sia da quello dei suoi flussi di energia e materia. Questo strumento ha iniziato ad essere utilizzato per il conseguimento di certificazioni come l'Ecolabel, per la comparazione di varie alternative tecnologiche nell'isolamento termico degli edifici, per la definizione dei potenziali impatti ambientali derivanti dalle richieste energetiche degli edifici, per la definizione delle riduzioni di emissioni di CO_2 nel campo edilizio in relazione ai materiali adottati, come strumento di analisi dei consumi energetici di ciascuna parte di una costruzione, etc. (Kofoworola & Gheewala, 2008). In questo contesto si spiega la maggior diffusione, in seguito, del sistema delle dichiarazioni ambientali di un prodotto (EPD) all'interno del settore dei prodotti delle costruzioni. Durante la conferenza organizzata nel 2001 dal CEPMC41, la Federazione europea dei produttori dei materiali da costruzione, si decise a costituire un Comitato tecnico europeo, il CEN/TC 350, che avesse la funzione di introdurre e successivamente garantire l'applicazione di strumenti e metodi per la sostenibilità di opere costruite nuove o esistenti. Da allora il Comitato ha operato in tale direzione attraverso l'utilizzo degli standard internazionali ISO. A livello internazionale, la dichiarazione ambientale di prodotto per il settore delle costruzioni è disciplinata dalla norma ISO 21930:2007. Il CEN/TC 350 è dunque il Comitato tecnico responsabile dello sviluppo di standard in grado di definire una metodologia armonizzata per la valutazione delle performance ambientali e dei costi dell'intero ciclo di vita degli edifici, così come gli aspetti

riguardanti il comfort indoor. Uno dei suoi obiettivi principali è quindi definire i contenuti e il formato delle EPD riguardanti questo settore così come le PCR riguardanti materiali da costruzione. Tale Comitato è composto dai seguenti tre Working Group (WG):

- WG1 "Environmental Performance of Buildings", che si occupa della determinazione delle performance ambientali degli edifici durante l'intero ciclo di vita mediante l'utilizzo di dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD);
- WG2 "Building Life Cycle Description", riguardante l'analisi e la descrizione dell'intero ciclo di vita di un edificio attraverso l'applicazione della tecnica LCA;
- WG3 "Product Level", con lo scopo di definire una sola PCR per tutti i prodotti da costruzione.

Oltre a questi tre Working Group è stato creato un Tasking Group denominato *framework* che ha l'obiettivo di creare il primo dei sette standard che il Comitato intende formulare e approvare, riguardante gli strumenti per l'integrazione dei tre aspetti per la valutazione della performance degli edifici, vale a dire ambientale, economico e salute & comfort (Baldo et al., 2008).

La LCA in edilizia è stata usata a partire dal 1990, diventando uno strumento sempre più importante nell'ambito della progettazione edilizia. Secondo Curran il metodo più appropriato per una valutazione olistica è la LCA, richiesto per promuovere le migliori metodologie, per valutare, analizzare e controllare il ciclo di vita, per impedire gli impatti ambientali e assistere il campo delle tecnologie ingegneristiche di costruzione (Ortiz et al., 2009).
Data la complessità dell'interazione tra l'ambiente costruito e quello naturale, la valutazione del ciclo di vita rappresenta un approccio globale per esaminare gli impatti ambientali dell'intero edificio. La LCA è un processo per mezzo del quale i flussi di materiali e di energia di un sistema sono quantificati e valutati. Tipicamente sono inventariati per primi i flussi di un prodotto o servizio a monte (estrazione, produzione, trasporto e costruzione), quelli in fase d'uso, e quelli a valle (decostruzione e smaltimento). La LCA dovrebbe oltretutto considerare non solo i materiali edilizi e il consumo energetico nella fase di costruzione e in quella d'uso, ma anche la produzione e il trasporto dei materiali, il loro riciclo, e la gestione dei rifiuti nella fase di decommissioning (Scheuer et al., 2003; Zheng et al., 2009).

2.6.2 Il processo edificatorio e i limiti di un LCA

Poiché al settore edilizio è imputabile una consistente quota di impatti ambientali lo strumento del Life Cycle Assessment risulta particolarmente idoneo permettendone di valutare i carichi energetici ed ambientali dei prodotti, processi ed attività. Il processo edificatorio crea notevoli impatti sull'ambiente in tutte le fasi di vita, dall'approvvigionamento delle materie prime alla produzione e al trasporto, fino alla dismissione dell'edificio e allo smaltimento delle macerie da demolizione:

- fase di estrazione e trattamento delle risorse primarie impiegate analizzando gli eventuali problemi di impatto ambientale e paesaggistico, nonché di depauperamento delle risorse;
- fase di produzione e lavorazione, tenendo conto dei danni all'ambiente esterno dovuti alle emissioni di inquinanti, agli scarti di trasformazione e al consumo di energia;
- fase di trasporto e distribuzione, confrontando il consumo di energia in rapporto alla quantità di prodotto dislocato e alla distanza tra zona di produzione e di consumo, contemplando anche i problemi connessi a sversamenti accidentali di materiale e tenendo conto dei consumi energetici e delle emissioni prodotte;
- fase di posa in opera, analizzando i problemi di inquinamento negli ambienti confinanti per il rilascio di sostanze tossiche, di radioattività, di umidità o di adsorbimento di inquinanti interni;
- fase di manutenzione e sostituzione, in rapporto al tipo di materiale edilizio utilizzato, ai prodotti impiegati per la pulizia e il mantenimento in efficienza, alla durabilità e quindi alla periodicità degli interventi di manutenzione;
- fase di uso, riuso e riciclo, al fine di limitare lo sfruttamento delle risorse disponibili e ridurre la produzione dei rifiuti e i problemi di inquinamento del suolo ad esso connessi;
- fase di demolizione e di ristrutturazione, prendendo in considerazione i problemi correlati allo smaltimento finale degli inerti e degli altri rifiuti speciali, e valutando la possibilità di recupero dei singoli componenti attraverso processi di riciclo nella fase di produzione (Nuzzo & Tomasinsig, 2008).

Per influire sulla riduzione degli impatti nel settore edilizio occorre dunque agire sinergicamente sia sul fronte della produzione edilizia (e dunque sugli impatti relativi a tutto l'indotto: approvvigionamento delle materie prime, risorse energetiche, produzione, riciclaggio, dismissione dei rifiuti da demolizione) sia sul fronte della progettazione dell'edificio (risparmio energetico, tecniche costruttive per la manutenzione e il disassemblaggio, flessibilità ed attendibilità per prolungare la vita utile dell'edificio, riqualificazione). Data la connessione esistente tra energia,

ambiente e sviluppo, per minimizzare l'impatto ambientale delle costruzioni e allo stesso tempo muoversi verso modelli di società sostenibile, è necessario considerare il bilancio globale relativo al ciclo di vita dell'edificio. L'edilizia è uno dei settori dell'urbanistica che maggiormente necessita di questa applicazione per poterne controllare gli impatti ambientali; fornisce, a tutti gli effetti, le infrastrutture necessarie a qualsiasi tipo di attività o necessità, che siano di carattere industriale, commerciale, di servizio e utilità, o di semplice residenza; l'edilizia soddisfa perciò uno dei bisogni più basilari e necessari dell'uomo. Dalla revisione della letteratura scientifica si nota che l'analisi del ciclo di vita dell'intero edificio considerato come processo non è statica: varia da edificio a edificio a seconda della propria funzione e delle differenti caratteristiche ingegneristiche (Ortiz et al., 2009). Nell'affrontare l'analisi del ciclo di vita di un edificio sorgono problemi di difficile risoluzione, primo tra tutti la difficoltà di valutare un edificio nel suo complesso poiché questi è un prodotto di lunga vita, di grandi dimensioni, costituito da svariati materiali diversi nelle caratteristiche e nella funzionalità, e dinamico, poiché i servizi o le attività al suo interno hanno in genere vita più breve, causando cambi di utilizzo e, quindi, di comportamento (energetico, ambientale, etc.) anche durante la sua vita utile. La letteratura evidenzia un'ampia varietà in merito alla durata della vita utile degli edifici, da 22 anni fino ad anche più di 100, alla tipologia costruttiva e alle consuetudini locali (De Meester et al., 2009). La maggior parte degli studi assume una durata di 75-80 anni (Kellenberger & Althaus, 2009). Gli edifici inoltre sono normalmente elementi unici, causano impatti locali, sono integrati con le infrastrutture, i confini del sistema non sono chiari, etc. Ciò implica che fare la LCA completa di un edificio non sia un processo diretto come invece è per altri prodotti di consumo (Bribián et al., 2009). Per questo motivo la produzione edile è molto meno standardizzata della maggior parte delle attività di lavorazione e manifatturiere, proprio a causa dell'unicità di ogni specifica costruzione. Oltretutto, ci sono condizioni dinamiche in ogni fase della vita di un edificio che possono influenzare il bilancio dei carichi ambientali: cambiamenti nella futura disponibilità delle risorse, nelle performance degli impianti, nelle regolamentazioni ambientali, nel comportamento degli occupanti, etc. Quando si discutono gli impatti del ciclo di vita di un edificio, è quindi importante valutare scenari multipli (Scheuer et al., 2003). In letteratura si trovano anche discussioni circa i limiti della LCA sugli edifici: Reijnders afferma che a causa della scala e della durata della vita utile degli edifici, e della risoluzione dei dati richiesti, solo gli impatti materiali e operativi possono esser attualmente valutati, mentre altri argomenti quali ad esempio il confort interno vanno oltre gli scopi di un tipico LCA (Scheuer et al., 2003). Alla luce delle problematiche esposte, appare chiaro perché in molti studi di analisi del ciclo di vita di edifici presenti in letteratura sia stato scelto come unità funzionale il singolo materiale o componente edilizio anziché l'edificio nel suo complesso; questa scelta ha però comportato il fatto di non poter

tener in considerazione, nello studio, alcuni importanti requisiti dell'edificio, quali ad esempio il confort termico invernale ed estivo, la qualità dell'aria interna, etc. ed altri effetti secondari inaspettati, che possono esser rilevati ed evitati solo con un metodo di analisi che consideri l'edificio nella sua complessità (Verbeeck & Hens, 2010).

2.6.3 Metodologia di un LCA in edilizia

Negli ultimi anni del secolo scorso i membri della Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) hanno lanciato vari gruppi di lavoro internazionali con il compito di discutere e, se possibile, armonizzare i diversi aspetti della metodologia per la valutazione del ciclo di vita. Gli obiettivi del gruppo di lavoro SETAC sul ciclo di vita nel settore edilizio e delle costruzioni erano quelli di identificare le caratteristiche importanti della LCA, e proporre linee guida o opzioni per le scelte metodologiche, così come anche proposte e raccomandazioni per il lavoro futuro. Il messaggio prevalente che è uscito dal gruppo di lavoro è la necessità di armonizzazione, consentendo così ai risultati degli studi LCA di essere comparati e usati per scelte consapevoli nel settore (Ekvall, 2005).

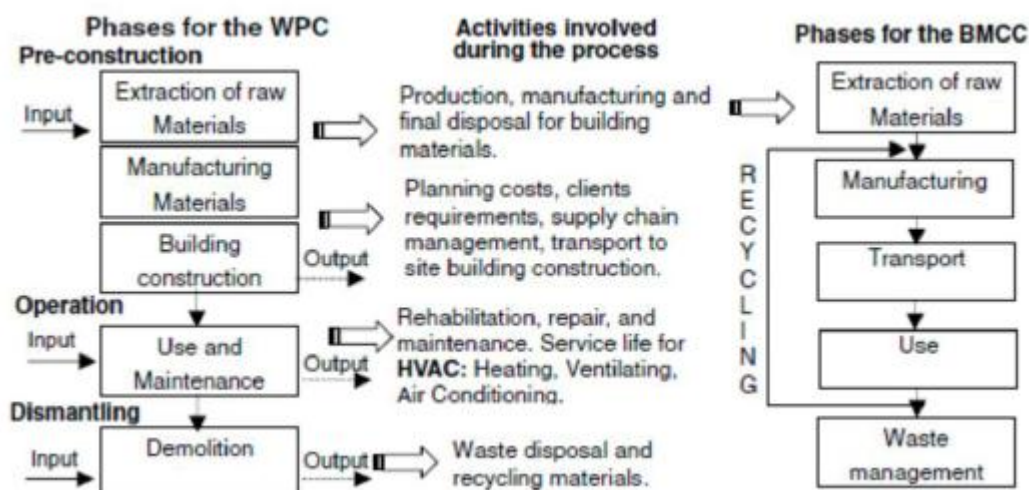



FIG-4 RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DEL CICLO DI VITA DI UN EDIFICIO, METTENDO A CONFRONTO LA LCA DELL'EDIFICIO NEL SUO COMPLESSO (WPC), E QUELLO RIFERITO AI MATERIALI EDILIZI (BMCC); FONTE: ORTIZ ET AL., 2009

La *LCA dell'edificio nel suo complesso* (WPC) viene suddivisa in molteplici LCA parziali (fig. 4). La prima fase riferita ai processi di estrazione e produzione dei prodotti edilizi, è basata su inventari "dalla culla al cancello" (che comprendono tutte le fasi di vita del prodotto edilizio, fino al suo stato

finale subito antecedente all'applicazione) indipendenti dall'applicazione e dalla fase d'uso; questo potrebbe comportare che il carico ambientale calcolato durante la fase d'uso non viene considerato.
La fase di manutenzione invece è stata riconosciuta come di fondamentale importanza nella vita utile dell'edificio, ma generalmente non viene trattata negli studi LCA per carenza di dati. Da una revisione della letteratura esistente in Spagna sul ciclo di vita dell'edificio nel suo complesso, risulta che la fase con il maggior impatto ambientale è la fase d'uso, con il 90% del totale, mentre la fase costruttiva rappresenta l'8% e quella di smantellamento meno del 2%. Tuttavia, anche se il contributo della fase costruttiva è basso, non può essere trascurata a motivo degli impatti legati al consumo eccessivo dei materiali edilizi, al consumo di acqua, e all'inadatta gestione dei rifiuti (Ortiz et al., 2010). Simili risultati si trovano anche nello studio di Kahhat et al. che, considerata una vita utile dell'edificio di 50 anni, mette in evidenza l'importante ruolo giocato dai consumi della fase di vita dell'edificio e la scarsa influenza che invece assume la fase di dismissione e smaltimento (Kahhat et al., 2009). La LCA svolta da Kofoworola e Gheewala (2008) sul settore delle costruzioni adibite ad uffici della Thailandia mostra l'elevata prevalenza dei consumi in fase operativa in questo tipo di costruzioni. La porzione di emissioni dovuta alla fase operativa è, infatti, superiore al 70% del totale per il potenziale di acidificazione e per quello di formazione di ossidanti fotochimici. Solo per quel che riguarda il potenziale di surriscaldamento globale questa porzione scende al 52%, a causa del maggiore onere dovuto alla fase di lavorazione dei materiali, che provoca importanti emissioni di CO_2, con un conseguente aumento del peso relativo di questa fase (Kofoworola & Gheewala, 2008).

2.6.4 Le fasi di vita dell'edificio

La ripartizione tra le tre fasi di vita di un edificio (costruzione, fase operativa, fine vita) è funzione, tra le altre variabili, dello stato di conservazione dell'edificio. Studi dimostrano infatti che, mentre gli edifici di nuova e più efficiente concezione consumano solo una frazione dell'energia consumata dai corrispettivi edifici risalenti agli anni settanta, l'energia spesa per la fase di costruzione è rimasta più o meno invariata, se non addirittura aumentata (Nässén et al., 2007). Per fare una valutazione LCA di un edificio di nuova costruzione occorre anzitutto definire la durata della vita utile dell'edificio stesso (in relazione alla funzione a cui è destinato) e del sistema impiantistico. Da tali durabilità dipendono infatti i cicli manutentivi e la quantità di energia complessiva derivante dall'uso dell'edificio.
Gli oneri di *costruzione* comprendono l'elettricità utilizzata per alimentare gli strumenti di lavoro e d'illuminazione, così come il carburante usato per le macchine più pesanti impiegate per la

costruzione del sito e per il trasporto dei materiali dai luoghi di preparazione e lavorazione al sito. Sono inoltre da tenere in considerazione le attività di preparazione del cantiere, le installazioni strutturali e di sviluppo, l'equipaggiamento di tipo meccanico ed elettronico e le rifiniture interne. Gli impatti ambientali di questa fase sono quindi la conseguenza dei consumi sul sito di costruzione, delle emissioni dovute alla lavorazione ed al trasporto al sito finale dei materiali da costruzione dai vari luoghi di estrazione. La *fase operativa* risente soprattutto delle attività di riscaldamento e condizionamento dell'edificio, dell'illuminazione artificiale e del consumo dei dispositivi elettrici e della fornitura di acqua sanitaria. Stime relative all'energia primaria associata alla fase operativa dell'edificio (principalmente per riscaldamento e condizionamento degli ambienti interni) varia su di un largo range, può rappresentare solo il 5%, fino anche a divenire più del 50% dell'energia necessaria a tutta la vita dell'edificio. Numerosi studi basati su dati relativi agli Stati Uniti suggeriscono che la porzione di energia e di emissioni di CO_2 causata delle costruzioni americane equivale a circa un decimo di quella necessaria al loro successivo sostentamento sotto forma di riscaldamento e condizionamento, considerata una vita media di 75-100 anni (Upton et al., 2008; Nuzzo & Tomasinsig, 2008). L'ultima fase della vita di un edificio è quella della sua *demolizione* e dello *smaltimento* di ciò che ne rimane; questa fase è spesso riassunta nel deposito in discarica della maggior parte dei materiali; le emissioni sono in maggior parte dovute ai macchinari di demolizione e a quelli di trasporto delle macerie dal sito dell'edificio alla discarica (Kofoworola & Gheewala, 2008). La fase end-of-life nel ciclo di vita degli edifici è generalmente non significativa (Ortiz et al., 2010). Ecco perché le valutazioni ecologiche degli edifici e dei materiali da costruzione sono spesso incentrate sulle fasi di produzione e di utilizzo; lo smaltimento viene spesso omesso. In un'analisi completa del ciclo di vita però tutti i processi dovrebbero essere considerati. La fase di fine vita, specialmente dei materiali minerali, può contribuire significativamente alla LCA e le diverse opzioni di smaltimento, fortemente influenzate dal tipo di costruzione, dalle modalità di utilizzo dei materiali, e dalle consuetudini di smaltimento sito-specifiche, possono avere impatti ambientali molto differenti (Althaus et al., 2005).

2.6.5 Conclusioni

I principali criteri per una corretta progettazione ecocompatibile riguardano la minimizzazione del consumo di materiali ed energia come input, la riduzione della tossicità e nocività delle risorse, l'utilizzo di risorse rinnovabili, biocompatibili e locali, l'ottimizzazione della vita dei prodotti attraverso una facile aggiornabilità e manutenzione, l'estensione della vita dei materiali e

un’intensificazione dell’uso del prodotto (Baldo et al., 2008). In ambito edilizio la qualificazione dei prodotti non è sufficiente a garantire la qualità ambientale dell’edificio nel suo complesso, poiché per una corretta valutazione ambientale i parametri progettuali devono prendere in considerazione e trovare il giusto equilibrio tra performance ambientale e qualità prestazionale, tra costi e flessibilità dell’offerta (Nuzzo & Tomasinsig, 2008). La scelta di materiali appropriati è molto importante perché la produzione dei materiali edilizi, la costruzione degli edifici e il loro successivo uso, costituisce, in termini generali, una fonte di effetti dannosi per l’ambiente. La conoscenza della valutazione ecologica del ciclo di vita di un edificio dovrebbe essere sfruttata nella scelta dei materiali e delle tecnologie di produzione, nelle soluzioni strutturali e di utilizzo degli edifici, dai progettisti e a maggior ragione dagli investitori (Sobotka & Rolak, 2009). Più di recente, uno studio globale europeo ha valutato vari tipi di abitazioni dell'UE. I risultati ottenuti per le nuove abitazioni hanno dimostrato che l'involucro dell'edificio, e quindi l’utilizzo di un certo tipo di materiale, ha avuto una parte significativa nell’LCIA. Si è scopeto che le pareti esterne e il tetto sono i componenti più importanti di una costruzione. Alcune pubblicazioni sono concentrate perciò sulle pareti esterne.
L’uso di materiali ambientalmente sostenibili migliora dunque i risultati dell’analisi del ciclo di vita di un edificio. L’energia cumulata salvata su un ciclo di vita di cinquant’anni grazie alla sostituzione di materiali ad elevata energia inglobata (come ad esempio il calcestruzzo rinforzato) con materiali alternativi, potrebbe essere dell’ordine del 20% (Bribián et al., 2009). L’importanza di uno studio LCA in fase progettuale risiede, tra le altre cose, nella possibilità di valutare le prestazioni energetiche di un edificio in funzione delle caratteristiche dei componenti dell’involucro, quali ad esempio i muri esterni, le finestre, etc. In uno studio svolto da Kahhat et al., ad esempio, sono presi in considerazione sei materiali differenti per i muri esterni e tratte le conclusioni in termini di emissioni di CO_2 delle tre principali fasi di processo, vale a dire costruzione, vita utile e dismissione finale. Si può incontrare una certa analogia tra i vari studi di questo tipo, dovuta al comportamento generalmente simile delle costruzioni. Questi evidenziano infatti un aumento della percentuale di energia spesa per la fase di costruzione rispetto alle restanti due fasi, a confronto con l’identica situazione in caso di utilizzo di materiali tradizionali, causato indirettamente dalla diminuzione dei consumi complessivi dell’edificio durante la sua vita utile, che, come già esposto, rappresenta la fase di consumo preponderante (Flower & Sanjayan, 2007). Per di più, con l’adozione di tecnologie e criteri costruttivi sempre più efficienti, la porzione di energia inglobata nelle fasi di costruzione va crescendo, fino a poter costituire il 15% del totale di energia spesa nella vita dell’edificio. In Germania, per esempio, le nuove costruzioni già

contengono il 30% dell’energia complessiva del loro ciclo di vita, e questa porzione potrà salire al 50% nel caso di case di nuova generazione a basso consumo (Balaras et al., 2005).
Sempre maggiore attenzione è dunque dedicata, in fase di progettazione, all’energia inglobata nei materiali e nei componenti delle costruzioni, e alla loro influenza sul ciclo di vita dell’edificio, poiché risulta considerevole sia per quel che riguarda le emissioni di inquinanti nei reflui sia relativamente all’emissione di gas serra. C’è quindi una chiara interrelazione tra tutti gli stadi del ciclo di vita di un edificio: se viene dedicata minore attenzione alla fase di progettazione (per esempio, poco isolamento), cresceranno gli investimenti e l’energia necessaria nella fase d’uso, e viceversa. L’introduzione della LCA rende evidente tale interrelazione e fornisce al costruttore un diverso punto di vista nella scelta degli investimenti da compiere che altrimenti sarebbe difficile ottenere (Zheng et al., 2009).

2.7 Il software Simapro 7.3.3

Il software utilizzato per calcolare gli impatti ambientali di uno studio LCA è il Simapro.
Questo programma è stato sviluppato dall’azienda olandese PRé (Product Ecology) Consultants a partire dal 1990 come strumento generale di lavoro in grado di realizzare le valutazioni dei carichi ambientali dei prodotti e dei processi industriali e in seguito anche gli impatti dei servizi, come la gestione integrata dei rifiuti. Simapro è in grado di analizzare i dati ambientali di prodotti e processi complessi, a partire dalla estrazione della materia prima fino alla dismissione. Il programma rispetta le norme della serie ISO14040 e contiene una banca dati di riferimento, modificabile secondo necessità, comprendente i dati più frequentemente richiesti sui materiali, sui processi di produzione, sulla generazione di energia, sulla distribuzione e sullo smaltimento dei prodotti. L’unità fondamentale di cui è costruita l’intera struttura del sistema è il processo.
Ogni processo ha alcuni campi che sono compilabili e riguardano:
- Input da altri processi (processi che sono descritti a loro volta nel database);
- Output; ogni processo ne ha uno, spesso ne può avere molteplici;
- Output di rifiuti per ulteriori trattamenti, quali processi di depurazione, incenerimento, etc.;
- Processi evitati (possibile utilizzo in ambito di problemi di allocazione e di gestione dei confini di sistema);
- Emissioni in aria, in acqua e al suolo;
- Rifiuti solidi finali;

- Emissioni non materiali, quali radiazioni e rumore;
- Impatti sociali ed economici;

Questi campi sono organizzati in progetti, o in librerie, e i valori d'impatto dei dati vengono forniti dal programma o da altre banche dati incluse nel software. Le banche dati sono un elemento fondamentale in una LCA poiché tutti i processi delle banche dati di cui si dispone possono in qualsiasi momento essere corretti ed integrati, fornendo la possibilità di creare nuovi processi o materiali, o di modificare quelli già esistenti, adattandosi alle necessità del caso studiato (Neri, 2007). Le banche dati forniscono gli elementi base per proseguire lo studio e in Simapro ne sono presenti circa 9: Ecoinvent Processes, DK Input Output Database 99, BUWAL 250, ETH-ESU 96 Processes, Franklin USA 98, IDEMAT 2001, Industry Data, LCA Food DK, USA Input Output Database 99. Il database Ecoinvent è l'archivio di dati scientifici dal quale sono stati attinti tutti i processi utilizzate nel nostro caso di studio. Esso contiene un inventario dettagliato relativo alla produzione e all'uso di energia e di materiali (chimici, metallici, plastici), alle attività agricole, ai servizi di smaltimento, ai trasporti.

I processi sono suddivisi secondo l'ambito dal quale traggono origine e sono suddivisi in 7 categorie: Materiali, Energia, Trasporto, Processo in corso, Uso, Scenario di smaltimento e Processo di Smaltimento, ognuna delle quali ulteriormente suddivisa in sottocategorie. Ogni processo può essere collegato ad un altro processo creando delle reti ed essere collegati dall'uno all'altro formando così una struttura ad albero di un intero sistema di produzione. Il programma è strutturato in quattro parti fondamentali, in cui vengono analizzati gli scopi e obiettivi (Goal and Scope), seguiti da un'analisi di inventario (Inventory), da un'analisi degli impatti (Impact Assessment) e da una fase di interpretazione e miglioramento (Interpretation), come in letteratura.

Il primo passo perciò è quello di creare un nuovo progetto nel quale viene definita l'unità funzionale l'obiettivo e il flusso di riferimento. I confini del sistema sono invece determinati dal numero di unità di processo che si vuole includere nel'analisi LCA.

In secondo luogo vengono inseriti i dati dell'analisi d'inventario, perciò i dati relativi a consumo di materie prime ed energia e emissioni; quindi vengono creati tutte le unità di processo che servono per la produzione del prodotto studiato. Completata l'analisi d'inventario viene scelto il metodo di valutazione degli impatti e il programma, una volta fatto girare, restituisce, attraverso tabelle e grafici (anche ad albero), l'impatto di tutte le unità del processo prese in considerazione. Per quanto riguarda gli impatti Simapro fornisce un'ampia varietà di metodi di valutazione tra i quali ci sono: CML 2001, Eco-Indicator 99, EPS 2000, EDIP 2003, IMPACT 2002+, BEES, IPCC 2007 GWP, etc. Sta all'utente scegliere che tipo di metodo di valutazione utilizzare.

CAP. 3 ISOLAMENTO TERMICO IN EDILIZIA

3.1 Introduzione

Le caratteristiche richieste agli edifici di oggi sono l'efficienza energetica e l'eco-compatibilità. Questa idea di sviluppo sostenibile degli edifici comprende varie questioni in materia di energia, acqua, suolo e conservazione delle risorse, insieme con l'inquinamento ambientale e la qualità degli ambienti interni ed esterni. L'attenzione alle componenti dell'involucro e dei loro effetti sulla efficienza energetica di un edificio è quindi estremamente rilevante dato l'attuale contesto. Nel prossimo futuro, tutti i nuovi edifici saranno costruiti al livello della casa passiva e gli edifici esistenti saranno rinnovati per soddisfare gli standard di costruzione a bassa energia. I nuovi approcci all'Energy efficient design non si stanno solo muovendo nella direzione di inferiori valori di trasmittanza per ottenere un minore consumo energetico, ma anche lo sviluppo e l'uso di materiali da costruzione naturali e locali (Korjenic et al, 2011). L'efficienza energetica dell'edificio può essere migliorata mediante l'attuazione di strategie energetiche passive o attive efficaci. Miglioramenti di riscaldamento, ventilazione e aria condizionata, illuminazione, possono essere classificati come strategie attive, mentre, miglioramenti agli elementi di involucro per edifici possono essere classificati come strategie passive. Gli ultimi anni hanno visto un rinnovato interesse in materia di isolamento passivo efficiente degli edifici. Essi sono visti come una soluzione praticabile per i problemi della crisi energetica e dell'inquinamento ambientale (Sadineni et al, 2011).

3.2 Isolamento termico

L'isolamento termico in edilizia consente di isolare termicamente l'interno di un edificio dal suo esterno, è il fattore chiave che determina la qualità e le condizioni degli ambienti interni. Varie componenti quali pareti, finestratura, tetto, fondazione, isolamento termico, massa termica, sistemi di schermature compongono questa parte importante di qualsiasi edificio. La qualità dell'isolamento termico si basa sulle proprietà termiche dei materiali oltre che sul loro dimensionamento. Fino a qualche tempo fa i materiali isolanti venivano valutati in base ai benefici apportati soprattutto nel

periodo invernale; oggi, a causa dei costi energetici sempre più onerosi del raffrescamento, l’attenzione si è focalizzata anche sulla prestazione nel periodo estivo. Le diverse tecniche progettuali si relazionano al materiale isolante impiegato a seconda che questo sia messo all'interno, in intercapedine o esterno.

3.2.1 Interno

Quando lo strato isolante viene messo interno rispetto allo strato di supporto. Questa tecnica è impiegata soprattutto negli edifici esistenti, quando risulta difficoltoso trovare soluzione più semplici. Presenta problemi un elevato rischio di condensa interstiziale e la creazione di ponti termici.

3.2.2 Intercapedine

È la soluzione che prevede due strati di supporto separati da una camera d'aria che può essere piena, semipiena, o vuota. Questa soluzione all'isolamento dovuto al materiale isolante, si aggiunge anche quello degli strati di supporto e/o della camera d'aria. Ideale nel caso di edifici esistenti con muratura a cassa vuota, ovvero con intercapedine d’aria già esistente. Non permette l’eliminazione dei ponti termici.

3.2.3 Esterno

L'isolamento esterno, comunemente detto a cappotto, prevede che il materiale isolante venga messo esternamente allo strato di supporto e protetto da un rivestimento (malta). In genere l’isolamento esterno è il migliore dal punto di vista energetico, è più efficace di quello interno, in quanto non altera il volume disponibile e diminuisce o addirittura elimina l’effetto dei ponti termici, evitando così il formarsi di muffe da condensa del vapore.

3.3 Ponte termico

Si definiscono ponte termico (Fig. 1) le discontinuità costruttive presenti in qualsiasi struttura edile, sia essa costruita con tecniche tradizionali sia con tecniche industrializzate.

Per discontinuità costruttiva si intende quella parte della struttura di un edificio che presenta caratteristiche termiche significativamente diverse da quelle circostanti. Caratteristica peculiare dei ponti termici sono le potenze termiche disperse la cui entità è molto più elevata di quella delle zone vicine. Un ponte termico incide negativamente sull'isolamento di un edificio perché costituisce una fuga privilegiata per gli scambi di calore fra interno e esterno.

Si possono individuare due tipologie di ponti termici:

· ponte termico geometrico;

· ponte termico costruttivo,

Nel primo caso si presenta una discontinuità geometrica, ad esempio in corrispondenza di uno spigolo; nel secondo caso invece è dovuto a discontinuità di materiali causate dall'inserimento di elementi che presentano caratteristiche termiche differenti.

In sintesi le cause principali di un ponte termico sono:

1) presenza di materiali diversi nella sezione dell'edificio (es. muratura di tamponamento in mattoni con struttura in cemento armato);

2) discontinuità geometrica nella forma della struttura (es. angoli);

3) interruzioni dello strato di isolamento termico (es. pilastri, travi marcapiano,serramenti, ecc.).

Poiché i ponti termici possono rappresentare fino al 30% del calore totale disperso, è essenziale che la loro azione venga neutralizzata con un'adeguata coibentazione.

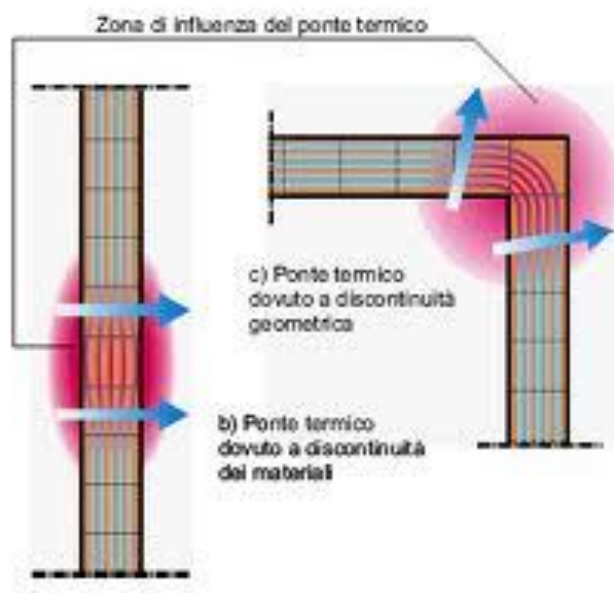



FIG-1 ESEMPI DI ALCUNE TIPOLOGIE DI PONTI TEMICI

3.4 Materiali isolanti per l'edilizia

L'isolante termico in edilizia è il materiale utilizzato nelle costruzioni per ridurre lo scambio di calore tra l'interno e l'esterno. L'isolante termico presenta un elevato livello di prestazioni di resistenza al passaggio del calore e, inserito all'interno di un sistema di involucro edilizio, è in grado di contribuire alla realizzazione della condizione benessere termico interno e alla riduzione delle dispersioni termiche con la conseguente riduzione del fabbisogno energetico dell'intero edificio.

Gli isolanti termici possono essere classificati in base a:

- Tipo di struttura (Fibrosa, cellulare, porosa);
- Tipo di materiale (Minerale, vegetale, animale, sintetico);
- Tipo di natura del materiale (Naturale, sintetico, organico, inorganico).

I materiali termoisolanti sono caratterizzati da una conduttività termica λ inferiore a 0,1 W/mK e sono principalmente porosi e fibrosi. Vanno protetti dall'umidità con barriere impermeabili o tenuti ben ventilati poiché, in presenza di umidità, perdono rapidamente le loro proprietà termoisolanti in quanto l'aria viene espulsa dall'acqua. A seconda che si intervenga in luoghi umidi o asciutti è necessario utilizzare materiali con caratteristiche differenti (Nuzzo & Tomasinsig, 2008).

Di seguito è riportato uno schema che rappresenta le varie tipologie di materiali isolanti:

ORIGINE MINERALE
STRUTTURA FIBROSA
Fibra di vetro
Fibra di roccia
STRUTTURA CELLULARE
Pomice naturale
Argilla espansa
Perlite espansa
Vermiculite espansa
Vetro granulare espanso
Calce-cemento cellulare
Vetro cellulare
ORIGINE SINTETICA
STRUTTURA FIBROSA
Fibra di poliestere
STRUTTURA CELLULARE
Polistirene espanso sinterizzato
Polistirene espanso estruso
Poliuretano espanso
Polietilene espanso
ORIGINE VEGETALE
STRUTTURA FIBROSA
Fibra di legno
Lana di legno e leganti minerali
Fibra di cellulosa
Fibra di Kenaf
Fibra di canapa
Fibra di lino
Fibra di mais
Fibra di cocco
Fibra di juta
Canna palustre
Erba
Paglia
STRUTTURA CELLULARE
Sughero
Sughero espanso
ORIGINE ANIMALE
STRUTTURA FIBROSA
Lana di pecora

3.5 Proprietà isolanti termici

La conducibilità termica (λ) è la proprietà fondamentale che caratterizza la prestazione termica di un materiale isolante (fig. 2); essa indica la quantità di calore che attraversa un metro quadrato di materiale avente lo spessore di un metro, in presenza di una differenza di temperatura tra esterno e interno di un grado Kelvin. È una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore, vale a dire maggiore è il valore di λ, meno isolante è il materiale (nelle unità del Sistema internazionale, la conducibilità termica è misurata in watt per metro-kelvin (W/(m·K) o $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Il grado di isolamento termico si misura mediante il coefficiente di trasmittanza termica, che determina il flusso di calore che avviene attraverso i componenti di una costruzione o dell'intero involucro di un edificio. Il valore indica la quantità di energia che passa attraverso un metro quadro di parete dell'edificio per ogni grado di differenza fra la superficie interna e quella esterna. È definita dall'inverso delle resistenze termiche degli strati che costituiscono la chiusura. Nelle unità del Sistema internazionale, la trasmittanza termica è misurata si misura in W/m^2K. L'inverso della trasmittanza per la superficie di conduzione è la resistenza termica ovvero la capacità di un materiale di opporsi al passaggio del calore. Essa descrive la capacità isolante di un elemento lungo una direzione di dispersione rappresentando la capacità del materiale di opporsi al passaggio di calore:

$$R = \frac{s}{\lambda}$$

Espressa in m^2/kW dove s è lo spessore dello strato e λ è la conduttività termica del materiale che compone lo strato. Per il calcolo della trasmittanza complessiva di una parete che separi due ambienti a diverse temperature è necessario definire la resistenza termica complessiva della parete; supponendo che la parete sia composta da diversi strati di materiali con altrettanti λ e all'interno della quale il moto di calore sia assimilabile ad un caso monodimensionale, possiamo esprimere la resistenza totale come:

$$Rtot = \frac{1}{h_i} + \sum \left(\frac{d_k}{\lambda_k} \right) + \frac{1}{h_e}$$

Alla sommatoria delle singole resistenze termiche di ogni strato vanno aggiunti i contribuiti del fenomeno convettivo. Quindi la trasmittanza termica complessiva finale di una parete è:

$$U_{parete} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_k \left(\frac{d_k}{\lambda_k} \right) + \frac{1}{h_e}}$$

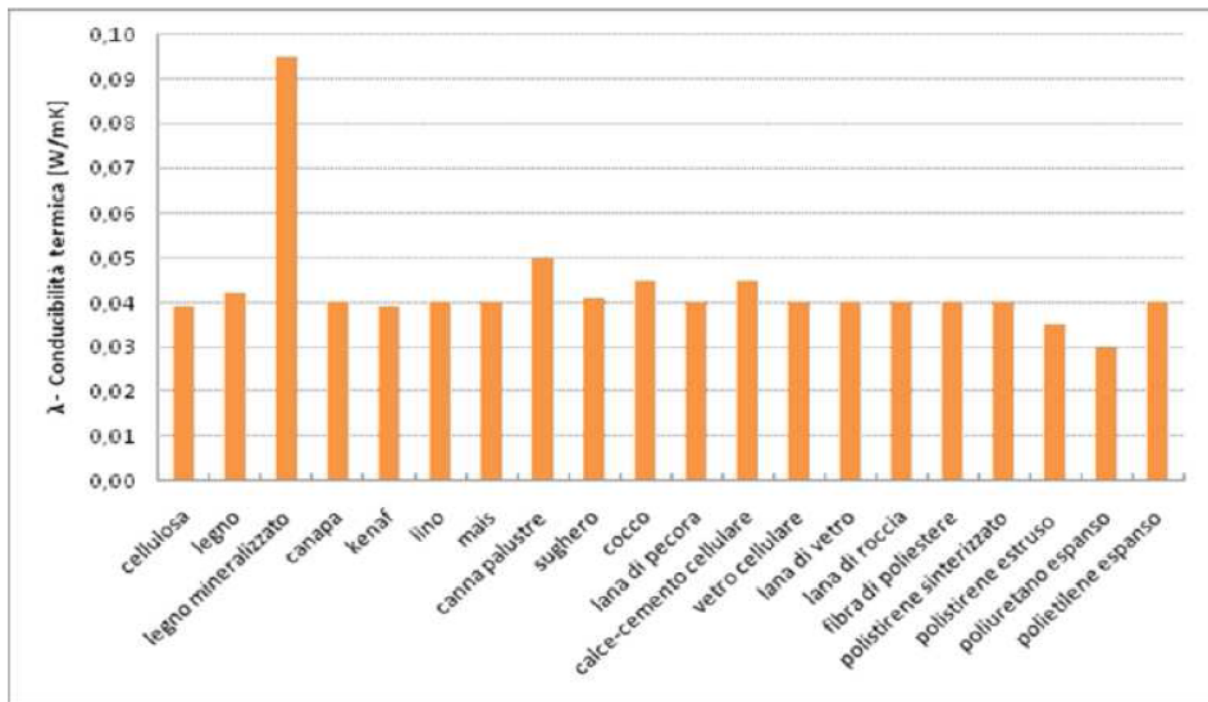



FIG-2 VALORI DI λ PER DIVERSI MATERIALI ISOLANTI

Il mercato europeo dei materiali isolanti è caratterizzato dal dominio di due gruppi di prodotti: i materiali fibrosi inorganici, vale a dire lana di vetro e lana di roccia, che rappresentano il 60% del mercato, e i materiali schiumosi organici, cioè polistirene espanso ed estruso e in misura minore il poliuretano, che rappresentano circa il 27% del totale; tutti gli altri materiali rappresentano meno del 13%. Le previsioni per i prossimi anni stimano per i materiali isolanti un tasso di crescita media annuale di più del 4% (Papadopoulos, 2005; Ardente et al., 2008). Questa previsione di crescita può offrire grandi potenzialità di impiego per i materiali naturali, che dal punto di vista delle performance risultano paragonabili agli isolanti sintetici coniugando però un minor impatto ambientale. Oggi la consapevolezza ambientale non è solo limitata al risparmio energetico, ma legata anche al costruire ecologico, all’input energetico, al consumo di risorse e all'inquinamento che sono una parte della produzione, installazione e uso di materiali isolanti (Korjenic et al, 2011). Di seguito un altro schema che descrive i valori di conducibilità termica, calore specifico e fattore di resistenza alla diffusione di vapore.

MATERIALI ISOLANTI		λ conducibilità termica [W m^{-1} K^{-1}]	c calore specifico [kj kg^{-1} K^{-1}]	μ fattore di resistenza alla diffusione di vapore
origine vegetale	fibra di cellulosa fiocchi	0,04	1,9	tra 1 e 5
	fibra di cellulosa panelli	0,039		
	fibra di cellulosa granuli sfusi	0,069		
	fibra di legno	0,042	2,1	tra 5 e 10
	fibra di legno mineralizzata	0,095	2	tra 5 e 10
	fibra di canapa	0,04	1,7	tra 1 e 5
	fibra di kenaf	0,039	1,7	tra 1 e 5
	fibra di lino	0,04	1,6	tra 1 e 5
	fibra di mais	0,04	1,9	tra 1 e 5
	canna palustre	0,05	1,3	tra 1 e 5
	sughero pannelli	0,041	1,85	tra 5 e 10
	sughero granuli sfusi	0,04		
	sughero granuli impastati	0,048 - 0,1		
	fibra cocco	0,045	1,45	tra 1 e 5
origine animale	lana di pecora	0,04	1,7	tra 1 e 5
origine minerale	perlite espansa pannelli	0,055	0,9	tra 1 e 10
	perlite espansa sfusa	0,051		
	perlite espansa impastata	0,094 - 0,15		
	vermiculite espansa sfusa	0,067	0,8	tra 1 e 5
	vermiculite espansa impastata	0,084 - 0,095		
	argilla espansa sfusa	0,11	0,9	tra 1 e 5
	argilla espansa impastata	0,16 - 0,31		
	vetro granulare espanso sfuso	0,075	0,85	tra 1 e 5
	pomice sfusa	1	0,9	tra 1 e 5
	pomice impastata	0,16 - 0,21		
	calce-cemento cellulare pannelli	0,045	1	tra 5 e 10
	calce-cemento cellulare pannelli	0,12		
	calce-cemento cellulare pannelli	0,15 - 0,18		
	vetro cellulare	0,04	0,85	1000
	lana di vetro	0,04	0,8	tra 1 e 5
	lana di roccia	0,04		
origine sintetica	fibra di poliestere	0,04	0,24	tra 1 e 5
	polistirene espanso sinterizzato(EPS)	0,04	1,4	tra 20 e 80
	polistirene espanso estruso(XPS)	0,035	1,45	tra 80 e 300
	poliuretano espanso (PUR)	0,03	1,3	tra 30 - 100
	polietilene espanso	0,04	1,2	2000

Per quel che riguarda l'impatto ambientale gli isolanti di origine vegetale, animale sono preferibili rispetto agli altri, in quanto il loro processo produttivo utilizza minori risorse non rinnovabili, ha emissioni di inquinanti più basse e maggiore sicurezza per la manodopera nel processo di estrazione e lavorazione dei materiali. Prendendo in considerazione il consumo di energia primaria necessario alla produzione di un materiale isolante si può notare come gli isolanti di origine vegetale e animale risultano notevolmente meno impattanti rispetto agli isolanti di origine sintetica e minerale. Particolarmente onerosi risultano i contributi della fase di approvvigionamento per quanto riguarda gli isolanti sintetici, mentre per quelli minerali risulta particolarmente dispendioso l'apporto legato al processo produttivo. In figura 3 sono rappresentati i consumi di energia primaria, in MJ, per quattro principali fasi di alcuni materiali isolanti

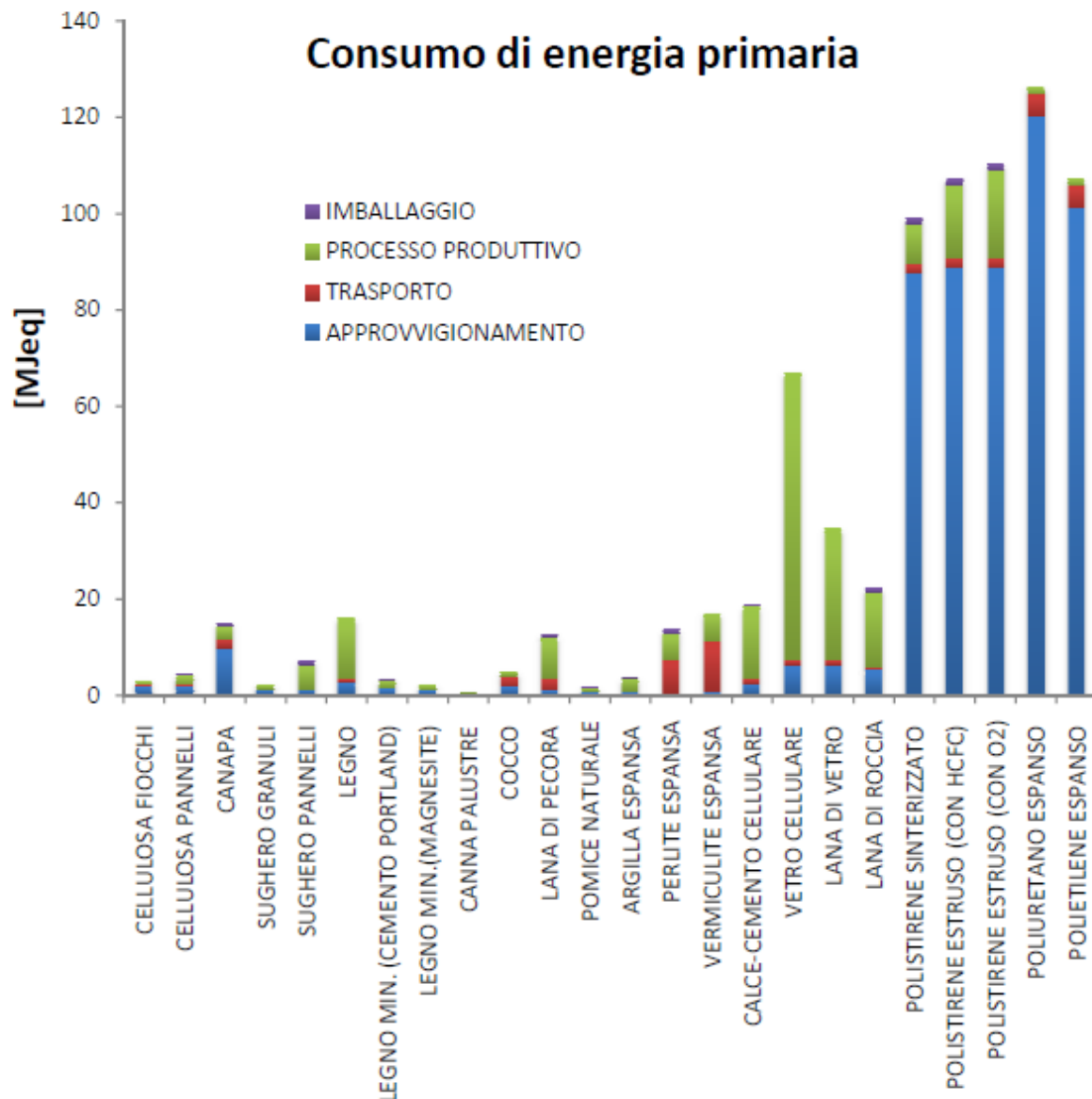



FIG-3 CONSUMI DI ENERGIA PRIMARIA PER ISOLANTI

3.6 Risparmio ed Efficienza energetica

I costi crescenti dei combustibili fossili e l'incertezza delle forniture si legano ai problemi dell'inquinamento atmosferico. Ne deriva che le esigenze economiche e quelle di tutela dell'ambiente convergano fatalmente verso un unico e di irrinunciabile obiettivo: il risparmio energetico. Una parte significativa del totale di energia primaria viene consumata dagli edifici odierni nei paesi sviluppati. In molti di questi edifici, il consumo di energia può essere ridotto significativamente adottando interventi di efficienza energetica. Ad esempio, circa il 39% del totale

dell’energia primaria degli Stati Uniti viene consumata da edifici, questo fatto sottolinea la necessità imperativa per il risparmio energetico negli edifici. Governi e le comunità scientifiche di tutto il mondo hanno individuato il potenziale e la necessità di efficienza energetica negli edifici, e hanno avviato notevoli sforzi in questa direzione (Sadineni et al, 2011). L’energia consumata nell’edilizia residenziale per riscaldare gli ambienti e per l’acqua calda sanitaria rappresenta circa il 30% dei consumi energetici nazionali, e rappresenta circa il 25% delle emissioni totali nazionali di anidride carbonica, una delle cause principali dell’effetto serra e del conseguente innalzamento della temperatura del globo terrestre.

Intraprendere interventi di risparmio energetico significa:

- Consumare meno energia e ridurre le spese di riscaldamento e condizionamento.
- Migliorare le condizioni di vita all’interno dell’appartamento migliorando il suo livello di comfort ed il benessere di chi soggiorna e vi abita.
- Partecipare allo sforzo nazionale ed europeo per ridurre sensibilmente i consumi di combustibile da fonti fossili.
- Proteggere l’ambiente in cui viviamo e contribuire alla riduzione dell’inquinamento del nostro paese e dell’intero pianeta.
- Investire in modo intelligente e produttivo i nostri risparmi.

In questi ultimi anni, sono state emanate a livello nazionale, regionale e locale diverse leggi e norme che indicano requisiti e criteri sia per la progettazione delle nuove costruzioni che per gli interventi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, che ha la caratteristica di presentare consumi energetici notevoli soprattutto se gli edifici sono costruiti prima della legge 373 del 1976 “Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici”. Successivamente venne introdotta un’ importante evoluzione nella normativa italiana, riguardante il risparmio energetico, ad opera dalla Legge 10/1991 “Norme per l'attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia” che rappresenta un punto di svolta della normativa nazionale in materia. A titolo informativo viene riportato l’elenco delle principali normative vigenti in Italia in tema di risparmio energetico:

- Legge 9 gennaio 1991, n.9 Norme di attuazione del nuovo piano energetico nazionale: aspetti istituzionali, centrali idroelettriche ed elettrodotti, idrocarburi e geotermia, autoproduzione e disposizioni fiscali
- Legge 9 gennaio 1991, n.10 Norme per l’attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell’energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia

- Direttiva 92/42/CEE del Consiglio del 21 maggio 1992 Direttiva concernente i requisiti di rendimento delle nuove caldaie ad acqua calda alimentate con combustibili liquidi o gassosi.
- Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n.412 Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, attuazione dell'art. 4, comma 4 della legge 9 gennaio 1991, n.10.
- Decreto ministeriale 6 agosto 1994 Recepimento delle norme UNI attuative del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n.412, recante il regolamento per il contenimento dei consumi di energia degli impianti termici degli edifici e rettifica del valore limite del fabbisogno energetico normalizzato.
- Decreto del Presidente della Repubblica 15 novembre 1996, n.660 Regolamento per l'attuazione della direttiva 92/42/CEE concernente i requisiti di rendimento delle nuove caldaie ad acqua calda, alimentate con combustibili liquidi o gassosi.
- Direttiva 19 dicembre 1996, n.96/92/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio Direttiva concernente norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica.
- Decreto legislativo 31 marzo 1998, n.112 Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali (Capo V – Ricerca, produzione, trasporto e distribuzione dell'energia).

Decreto ministeriale 2 aprile 1998 Norma riguardante le modalità di certificazione delle caratteristiche e delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti ad essi connessi.
- Direttiva 22 giugno 1998, n.98/30/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio Direttiva relativa a norme comuni per il mercato interno del gas naturale.
- Decreto legislativo 16 marzo 1999, n.79 Norma di attuazione della direttiva 96/92/CEE recante norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica.
- Decreto del Presidente della Repubblica 30 settembre 1999, n.361 Istruzioni per l'effettuazione dei controlli sull'utilizzazione, in particolari zone geografiche, di gasolio e gpl per riscaldamento, beneficianti di una riduzione di prezzo.
- Direttiva 1999/94/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 13 dicembre 1999 Direttiva relativa alla disponibilità di informazioni sul risparmio di carburante e sulle emissioni di CO_2 da fornire ai consumatori per quanto riguarda la commercializzazione di autovetture nuove.
- Decreto del Presidente della Repubblica 21 dicembre 1999, n.551 Regolamento recante modifiche al Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993 n. 412 in materia di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia.

- Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio 16 dicembre 2002 Direttiva sul rendimento energetico nell'edilizia.
- Decreto ministeriale 17 marzo 2003 Aggiornamenti agli allegati F e G decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n.412, recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia e nota del Ministero delle attività produttive del 15 maggio 2003 contenente l'errata corrige del suddetto decreto.
- Direttiva 2003/96/CE del Consiglio del 27 ottobre 2003 Direttiva che ristruttura il quadro comunitario per la tassazione dei prodotti energetici e dell'elettricità.
- Decreto legislativo 29 dicembre 2003 n. 387 Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità.
- Direttiva 2004/8/CE del Parlamento europeo e del Consiglio dell'11 febbraio 2004 Direttiva sulla promozione della cogenerazione basata su una domanda di calore utile nel mercato interno dell'energia e che modifica la direttiva 92/42/CEE.
- Decreto ministeriale 20 luglio 2004 Nuova individuazione degli obiettivi quantitativi per l'incremento dell'efficienza energetica negli usi finali di energia, ai sensi dell'art.9, comma 1, del decreto legislativo 16 marzo 1999, n.79.
- Legge 23 agosto 2004, n.239 Riordino del settore energetico, nonché delega al Governo per il riassetto delle disposizioni vigenti in materia di energia.
- Direttiva 2005/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 6 luglio 2005 Direttiva relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia e recante modifica alla direttiva 92/42/CE e 2000/55/CE del Parlamento europeo e del Consiglio.
- Decreto ministeriale 28 luglio 2005 Norma concernente il regolamento d'attuazione della legge 9 gennaio 1991, n.10 (articolo 4, commi 1 e 2), recante: "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia".
- Decreto ministeriale 28 luglio 2005 Criteri per l'incentivazione della produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare.
- Decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192 Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.
- Decreto ministeriale 6 febbraio 2006 Decreto di modifica del decreto ministeriale 28 luglio 2005.
- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 Norme in materia ambientale (testo unico).

- Decreto legislativo 4 aprile 2006, n.216 Attuazione delle direttive 2003/87 e 2004/101/CE in materia di scambio di quote di emissioni dei gas a effetto serra nella comunità, con riferimento ai meccanismi di progetto del Protocollo di Kyoto.
- Direttiva 2006/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 5 aprile 2006 Direttiva concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio.
- Decreto ministeriale 22 dicembre 2006 Approvazione del programma di misure ed interventi su utenze energetiche pubbliche, ai sensi dell'articolo 13 del decreto del Ministro delle attività produttive di concerto con il Ministro delle attività produttive, di concerto con il Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio 20 luglio 2004.
- Decreto legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 Disposizioni correttive e integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005 n.192 recante attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.
- Decreto legislativo 8 febbraio 2007, n.20 Attuazione della direttiva 2004/8/CE sulla promozione della cogenerazione basata su una domanda di calore utile nel mercato interno dell'energia, nonché modifica alla direttiva 92/42/CEE.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 19 febbraio 2007 Criteri e modalità per incentivare la produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare, in attuazione dell'articolo 7 del decreto legislativo 29 dicembre 2003 n. 387.
- Decreto ministeriale 19 febbraio 2007 Disposizioni in materia di detrazioni per le spese di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, ai sensi dell'articolo 1, comma 349, della legge 27 dicembre 2006, n.296.
- Decreto legislativo 30 maggio 2008, n. 115 Disposizioni in materia di attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE.
- Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n.59 Criteri generali, metodologie di calcolo e requisiti minimi per la prestazione energetica di edifici e impianti termici per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda sanitaria.
- Decreto interministeriale 26 giugno 2009 Disposizione delle linee guida nazionali per la certificazione energetica e degli strumenti di raccordo, concertazione e cooperazione tra Stato e regioni.

In particolare in Lombardia:

- Deliberazione Giunta Regionale D.G.R. 5018 del 26 giugno 2007 «Disposizioni inerenti all’efficienza energetica in edilizia».
- Decreto Dirigenziale n. 9527 del 30 agosto 2007 aggiornamento della procedura di calcolo per determinare la prestazione energetica degli edifici.
- D.G.R. 5773 del 31 ottobre 2007 modifiche ed integrazioni al D.G.R. 5018/2007 (tutti gli allegati escluso E).
- Decreto dirigente unità organizzativa D.d.u.o. 13 dicembre 2007 - n. 15833 Aggiornamento della procedura di calcolo per predisporre l’attestato di certificazione energetica degli edifici (allegato E)
- Il 15 gennaio 2009 è stata pubblicata la DGR VIII/8745 che integra e modifica la precedente delibera.
- D.G.R 5796 dell'11 giugno 2009 Aggiornamento della procedura di calcolo per predisporre l’attestato di certificazione energetica degli edifici (allegato E).

Nel maggio del 2010, i paesi membri dell’UE hanno adottato una rifusione della direttiva sul rendimento energetico dell’edilizia (EPBD, 2002/91/CE), che stabilisce i requisiti per l’efficienza energetica in regolamenti edilizi, compresi gli standard minimi di rendimento energetico e certificazione energetica (2010/31/CE) (in Lombardia è predisposta attraverso l’utilizzo del CENED).

Per risparmiare ogni anno tanto combustibile dobbiamo:

1) ridurre le dispersioni di calore in inverno e le rientrate di calore in estate, predisponendo un adeguato isolamento dell’edificio;
2) limitare le fughe di aria calda attraverso i vetri e gli infissi delle finestre;
3) abbassare la temperatura di riscaldamento nei locali non utilizzati;
4) sfruttare al meglio l’energia contenuta nel combustibile progettando, manutenendo e regolando bene l’impianto di riscaldamento e condizionamento.

Tutto questo significa spendere del denaro; ma questo investimento, a sua volta, porta ad un risparmio immediato sulle nostre bollette. Non tutte le misure da adottare sono di tipo tecnologico, ma sono anche di tipo comportamentale. Se si analizza il parco edilizio lombardo si può capire l’entità di risparmio che si potrebbe avere diffondendo la cultura del risparmio e dell’efficienza energetica; buona parte degli edifici lombardi ed italiani presentano prestazioni energetiche particolarmente basse, basti pensare che il consumo energetico medio di un’abitazione tipo è circa pari a 150-200 kWh/m^{2}anno (figura 4), valore decisamente troppo elevato rispetto agli altri paesi europei.

FIG-4 FABBISOGNO SPECIFICO DI ENERGIA PRIMARIA PER IL RISCALDAMENTO

Dai dati del censimento ISTAT 2001 emerge che il 70% degli edifici sono stati realizzati prima di qualsiasi normativa in materia di risparmio energetico (figura 5).

EPOCA DI COSTRUZIONE	Abitazioni in edifici ad uso abitativo	
Prima del 1919	3 893 567	14%
Dal 1919 al 1945	2 704 969	10%
Dal 1946 al 1961	4 333 882	16%
Dal 1962 al 1971	5 707 383	21%
Dal 1972 al 1981	5 142 940	19%
Dal 1982 al 1991	3 324 794	12%
Dopo il 1991	2 161 345	8%
Totale	**27 268 880**	

FIG-5 EPOCA DI COSTRUZIONE DI ABITAZIONI

Questa situazione contingente ci fa capire che ci troviamo di fronte a una grande possibilità di ottenere enormi benefici energetici ed economici portando avanti una riqualificazione del parco edilizio esistente, tenendo presente che le case passive presentano consumi inferiori a 15 kWh/m^{2}anno, 10 volte inferiori al consumo medio di una abitazione tipo lombarda!

CAP. 4 IL NUOVO BIOCOMPOSITO DELLA BIOEDILIZIA

In questo paragrafo vengono elencati e descritti i materiali utilizzati per la produzione della miscela di cemento in calce e canapa, partendo dalla presentazione dell'azienda (**Equilibrium**) che produce questo biocomposito. Attraverso l'applicazione di sistemi di costruzione e di isolamento naturale con composti a base di calce e canapa, quali il biomattone e il Natural Beton, i prodotti Equilibrium rappresentano un'alternativa ecosostenibile decisamente più performante rispetto ai materiali sintetici convenzionali. Inoltre sono elencate alcune applicazioni, tra le più utilizzate di questi prodotti, sia per le nuove costruzioni sia per edifici già esistenti soggetti ad opera di restauro.

4.1 Cos'è Equilibrium

Equilibrium è un'impresa olistica che opera nel settore della bioedilizia, dei materiali da costruzione naturali e delle tecnologie per l'efficienza energetica, consapevoli che il risparmio energetico e la salubrità degli ambienti sono diventati fattori chiave per la qualità del vivere, puntano alla riduzione dei consumi energetici di edifici nuovi ed esistenti e al miglioramento del comfort abitativo degli occupanti, mediante l'applicazione di sistemi di costruzione e di isolamento naturale con composti a base di calce e canapa.
L'azienda si fonda su tre pilastri portanti:
-Il rispetto per l'ambiente e l'impegno a rigenerarlo;
-Il rispetto e la valorizzazione del capitale umano che le dà vita e dei rapporti con le persone con cui interagisce;
-L'attenzione al ritorno economico necessario per operare e investire in innovazione, ricerca e sviluppo.
Equilibrium distribuisce prodotti e soluzioni studiati e realizzati per soddisfare le crescenti esigenze del mercato edile e per risolvere tutte le criticità legate alla cattiva gestione del vapore acqueo e dell'umidità tipica dei materiali convenzionali di origine minerale e sintetica. Applicando quindi un elevato comfort abitativo, un risparmio energetico tangibile e costi allineati all'edilizia tradizionale.
Le soluzioni costruttive di questa azienda consentono di raggiungere un elevato risparmio energetico in due modi: utilizzo di materiali naturali con un basso livello di energia grigia (la quantità di energia necessaria per l'estrazione, la trasformazione, l'impiego e lo smaltimento) e

riduzione al minimo del fabbisogno energetico per riscaldare/raffrescare l'edificio, ottimizzandone le prestazioni igro-termiche. In ambito civile Equilibrium propone sia la realizzazione e la progettazione di ville, villette e palazzine 'Passive' o in 'Classe A', completamente naturali, salubri ed eco-compatibili; sia la ristrutturazione di abitazioni ed edifici moderni con l'obiettivo di aumentarne il valore, migliorarne la classe energetica, accrescere il comfort abitativo e risolvere qualsiasi problema di umidità (http://www.equilibrium-bioedilizia.com/).

4.2 Il biocomposito calce e canapa

La miscela di canapa e calce è un materiale biocomposito ottenuto dalla combinazione della parte legnosa dello stelo, ovvero il canapulo, ed un legante a base di calce idraulica con aggiunta di acqua. La miscela viene formulata, lavorata in impastatrice e quindi applicata a mano o a macchina, secondo gli impieghi. Successivamente alla messa in opera, il cemento calcecanapa indurisce per evaporazione dell'acqua, carbontazione e idratazione della calce. Il tipo di legante (calce aerea, calce idraulica ecc.), il tipo di canapa (lunghezza del canapulo, ecc.) e le loro proporzioni (quantità di calce e canapulo utilizzati), determinano materiali con caratteriste e proprietà distinti, adatti ai differenti utilizzi in edilizia.

Alcune caratteristiche fisiche di Calcecanapa (in funzione del mix e della messa in opera) sono:

• Massa volumica a secco: 300-900 kg/m^3;
• Coefficiente di conduttività termica: 0.04 - 0.12 - W/mk;
• Calore specifico: 1.0 - 1.4 kJ/kg*K;
• Resistenza alla compressione: 0.2 - 1.0 N/mm^2.

La canapa funge da materiale riempitivo leggero, detto anche aggregato, mentre la calce funge da legante e conservante. Il canapulo è solitamente un sottoprodotto della lavorazione della fibra di canapa ed essendo naturalmente ricco di silice, aiuta l'indurimento della calce. Una volta indurito, il biocomposito si trasforma in un materiale rigido e leggero con ottime caratteristiche di isolamento e durevolezza. Il biocomposito calce-canapulo può essere impegnato nella costruzione di muratura massiccia alla stregua di un conglomerato cementizio, sia indipendentemente che come riempimento di una struttura di legno a travi e pilastri. Esso è tra le diverse tecniche ecocompatibili più importanti e promettenti ed è decisamente il linea con i tre pilastri dello sviluppo sostenibile: quello ambientale, quello sociale e quello economico. Dal punto di vista ambientale la miscela di

calce e canapa è in grado di ridurre le emissioni di diossido di carbonio grazie alle sue proprietà di isolamento termico e di sequestrare CO_2 nella struttura degli edifici. Rende inoltre superfluo l'utilizzo di diversi materiali sintetici aiutando così a ridurre la dipendenza dai combustibile fossili, e data la riciclabilità della calce e la biodegradabilità della canapa risulta essere un materiale che non crea problemi di smaltimento: il biocomposito è riciclabile in quanto se sgretolato e reinpastato in betoniera con nuova calce e acqua può essere utilizzato per murature, sottofondi, e vespai; biodegradabile in quanto composto da legno e calcare. Dal punto di vista economico, il biocomposito è sostenibile in quanto è un materiale prodotto a livello locale, inoltre è in grado di collegare direttamente industria e agricoltura. Riduce la dipendenza da materiali da costruzione sintetici e la crescita dell'occupazione è una diretta conseguenza. Anche dal punto di vista sociale ha notevoli risvolti benefici. Poiché il settore agricolo è in declino nella maggior parte dei paesi sviluppati, la canapa diventerebbe per gli agricoltori una coltura e una fonte di guadagno. Inoltre l'ambiente salubre all'interno degli edifici di canapa è un ulteriore beneficio per la comunità. L'uso della canapa miscelata con la calce idraulica ha iniziato a diffondersi nell'industria edile nei primi anni '90. Sembra che tuttavia fosse una tecnica già conosciuta ed utilizzata circa 1500 anni fa, infatti è stato ritrovato, nel Sud della Francia, un ponte costruito con questo materiale conglomerato di calce e canapa che risale al periodo Merovingio, tra il 500 ed il 751 d.c. Più recentemente, l'uso del biocomposito di calce e canapa si è diffuso in Francia, nella regione di Troyes per la conservazione degli edifici medievali con struttura in legno andando a sostituire gli antichi materiali di riempimento che prevedevano il tradizionale metodo " a cannicciata di fango". Il cemento biedilizio è stato scoperto come soluzione per i danni causati dall'utilizzo improprio del cemento, in quanto il riempimento prima veniva coperto con intonaco a base di cemento e l'intrappolamento dell'umidità all'interno causava il rigonfiamento del riempimento e lo staccamento dell'intonaco. Oggi in Francia esistono diverse centinaia di case costruite con il biocomposito di canapa e calce e circa 4000 tonnellate di canapulo vengono utilizzate dall'industria edile, per un fatturato totale di 35 milioni di Euro. Nel Regno Unito invece il cemento di calce e canapulo è un concetto piuttosto recente. Ufficialmente è stato Ralph Carpenter di Modece Architects il primo ad utilizzarlo in via sperimentale all'interno di un progetto di edilizia popolare nel sud dell'Inghilterra. L'intero progetto è stato monitorato e misurato da Building Research Estabilishment, una società di ricerca e consulenza specializzata in edilizia sostenibile, con il fine di investigare le proprietà strutturali, termiche, acustiche, di permeabilità e durevolezza, così come la riduzione dei rifiuti generata sul posto durante i lavori, l'impatto ambientale, ed i costi di costruzione. La ricerca sul cemento in calce e canapulo viene attualmente condotta in diverse università del Regno Unito. Essendo però questo cemento una innovazione del settore edile, non è ancora coperto da linee guide ufficiali. Per

questo motivo, nel 2006, diverse aziende e professionisti si sono uniti per formare la Hemp Lime Costruction Products Association. Tra i suoi fini vi è quello di promuovere l'uso del biocomposito di canapa e calce all'interno dell'industria edile britannica e quello di promuovere i suoi benefici rispetto ai metodi costruttivi più ricorrenti. Il biocomposito di calce e canapulo si presta ad una vasta gamma di applicazioni, incluse quelle domestiche, industriali e commerciali. Di seguito vengono elencate alcune di queste applicazioni ora in uso (Ronchetti P., 2007).

4.2.1 Riempitivo isolante per muri

La miscela in calce e canapa ha una resistenza a compressione di circa 0,2-0,1 N/mm e quindi non viene normalmente utilizzato in situazione di eccessivo carico. Il suo utilizzo è consigliato solitamente in combinazione con una struttura di legno per sostenere il perso strutturale (fig. 1), oppure in alternativa con strutture in acciaio e cemento che sono comunque valide. La miscela (Natural Beton, con diversi rapporti tra calce e canapa) può essere pressata e versata all'interno dei pannelli di contenimento, oppure spruzzata utilizzando un pannello unico di contenimento permanente sia nella parte interna o esterna. Lo spessore del muro può variare da 200mm a 500mm, e non è necessario l'utilizzo di pannelli di rivestimento, barriere vapore, panelli isolamenti o cellulosa soffiata. Inoltre l'intonacatura interna può essere evitata a differenza di quella esterna che è necessaria per proteggere il muro dagli agenti atmosferici. Poiché il materiale è disponibile anche in mattoni (biomattoni, anch'essi dotati di un rapporto calce e canapa ben definito che ne identifica le proprietà e le caratteristiche tecniche e applicative), questi devono essere posati con cemento a base di calce che comunque è un'opzione più costosa e che fa perdere molti benefici (Ronchetti P., 2007).

FIG-1 CANAPA E CALCE SU STRUTTURA IN LEGNO (SOURCE:WOOLLEY E BEVAN 2007)

4.2.2 Isolante per tetti e per pareti

Avendo alte proprietà isolanti, il cemento di canapa e calce può essere applicato sui tetti utilizzando un pannello di contenimento interno e spruzzando il mix tra una trave ed un'altra. Secondo Allin (2005), la miscela deve contenere solo una piccola quantità di calce in grado di ricoprire le particelle di canapa e fissarle l'una con l'altra. La struttura non deve essere sovraccaricata e per questo motivo la miscela deve essere estremamente leggera. Inoltre sono previsti anche isolamenti delle pareti della casa (pareti esterne, intercapedini, parete interna) (Ronchetti P., 2007).
Le figure qui sotto (fig. 2 e fig. 3) mostrano un esempio di applicazioni sul tetto e su pareti.

FIG-2 CEMENTO DI CANAPA E CALCE COME ISOLANTE PER TETTI (SOURCE:WOOLLEY E BEVAN 2007)

FIG-3 CEMENTO DI CANAPA E CALCE COME ISOLANTE PER PARETI (SOURCE:WOOLLEY E BEVAN 2007)

4.2.3 Il cappotto isolante

Il cappotto isolante è uno dei metodi oggi più utilizzati per evitare le dispersioni di calore da case ed edifici che devono essere ristrutturati oppure che sono poco o male coibentati. Una soluzione pratica, efficace e conveniente per isolare una struttura intervenendo sulle pareti interno o esterne. Scegliere il cappotto isolante in canapa e calce significa ridurre notevolmente i consumi energetici e prestare attenzione verso le problematiche ambientali attuali. Il cappotto isolante con Natural Beton, rappresentato nella foto sottostante, è rappresentato da uno strato di materiale isolante in canapa e calce che viene applicato direttamente sui muri interni o esterni dell'edificio (fig. 4). Si tratta di un intervento rapido che non richiede di modificare i muri esistenti. Una volta applicato, il materiale isolante viene ricoperto da uno strato di intonaco, uno di rafforzamento e uno di finitura, in modo tale che venga preservata l'estetica pre-esistente dell'edificio. Oltre alla dispersione di calore, il cappotto termico impedisce la formazione di ponti termici interni che si vengono a creare in determinate zone della struttura dell'edificio, ad esempio dove è presente il calcestruzzo (Ronchetti P., 2007).

FIG-4 NATURAL BETON COME CAPPOTTO TERMICO

4.2.4 Intonaco isolante per muri (interni ed esterni)

La miscela si è dimostrata efficace anche per lavori di intonacatura. Per produrre un materiale lavorabile, il mix deve contenere una maggiore quantità di calce. Oltre che negli edifici interamente realizzati con il biocomposito, l'intonaco di calce e canapa sta confermando il suo successo quando viene applicato sui muri tradizionali (fig. 5) e risulta estremamente efficace per l'upgrade termico di vecchie costruzioni con muri in sasso poiché riesce a mantenere le proprietà di isolante facendo fronte ad alcuni problemi di umidità e infine rimanendo caldo al tatto. Con il biocomposito si può realizzare una vasta gamma di intonaci, applicabili a mano e/o a macchina, anche in spessori superiori ai 10 cm, migliorando notevolmente il comfort termico e acustico della parete sottostante (Ronchetti P., 2007).

FIG-5 INTONACO ISOLANTE IN CALCE E CANAPA

4.2.5 Soletta isolante per piani terra o intermedi e massetto isolante per pavimenti

Il biocomposito bioedilizio può anche essere gettato in sostituzione dei sottofondi alleggeriti della soletta. Può servire come massetto ed è ideale per il riscaldamento a pavimento. Le piastrelle possono essere posate al di sopra, in modo da evitare l’impiego di materiali tossici sintetici (Ronchetti P., 2007).

4.2.6 Costruzione di murature non portanti (blocchi, mattoni, pannelli)

Blocchi e mattoni di Calcecanapa, allettati con legante di calce e canapa, trovano impiego nelle tamponature di strutture portanti (cemento armato, legno ecc.) e tramezzature interne. I blocchi e i mattoni sono fabbricati in diversi formati e posso essere pieni o cavi. Il biocomposto calcecanapa viene anche gettato direttamente in opera, all'interno di casseri, per la realizzazione di muri, contropareti ecc. I vantaggi del tamponamento con questi materiali sono: alte prestazioni di isolamento termico grazie ai valori di conduttività che variano da 0,05 a 0,07 W/mK, resistenza meccanica, isolamento acustico e inerzia termica al di sopra degli standard tradizionali, regolazione dell’umidità attraverso l’assorbimento ed il rilascio di vapore e la riciclabilità dei materiali (Ronchetti P., 2007).
Di seguito sono riportate le stratigrafie utilizzate da Equilibrium per queste murature e le proprietà di alcuni materiali utilizzati:

4.2.6.1 Equilibrium Wall

Stratigrafia: lastra di magnesite tipo Megapan da 10 a 12 mm - struttura in profili di legno o di ferro zincato tipo "Cipriani" - Natural Beton in canapa e calce (1a1) dai 20 cm (K= 0.26 W/m^{2}k) ai 40 cm (K=0.13 W/m^{2}k), Lambda = 0.053 W/mk - struttura in profili di legno o di ferro zincato tipo "Cipriani" - lastra di magnesite tipo Megapan da 10 a 12 mm, sfasamento termico:16h.
Coefficiente di assorbimento acustico 0,8 , i.a.a.50dbi.

4.2.6.2 Lastra di magnesite tipo Megapan

La lastra di magnesite tipo Megapan, utilizzata nel pacchetto stratigrafico appena descritto è un pannello da costruzione ecologico, ignifugo, resistente all'acqua e agli urti, particolarmente adatto ai rivestimenti di interni e di esterni. Le sue caratteristiche sono: resistenza al fuoco e all'umidità, l'assenza di tossicità e di odore, la resistenza al deterioramento e agli insetti, l'elevata robustezza nonostante il peso ridotto. E' un nuovo tipo di pannello realizzato con una base di ossido di magnesio e cloruro di magnesio, rinforzato mediante una rete in fibra di vetro resistente agli alcali e riempito da una mescola leggermente modificata. Presenta un lato estremamente liscio e l'altro con superficie granulosa.

Il pannello Megapan viene utilizzato principalmente per la realizzazione di pareti divisorie e soffitti e ben si adatta alla sostituzione dei tradizionali pannelli da costruzione.

Di seguito è riportata la documentazione tecnica del pannello in magnesite:

- è resistente alla combustione fino a 800°C non produce fiamme fino a 1200°C ;
- è leggero (0,9 – 1,4 g/m²);
- è flessibile e resistente agli urti (resistenza media alla flessione > 16 MPa, resilienza > 3,6 KJ/m²);
- è impermeabile e resistente all'acqua (non è soggetto a deformazione in un ambiente umido, caldo e secco); la quantità di acqua assorbita è del 18%. Gonfiore e la distorsione non si verificano. Il cambiamento di forma (rispetto a secco umido) è 0,26%.

Il pannello è permanentemente resistente a umidità e muffa, che lo rende la scelta migliore, poiché la sicurezza di un edificio deve essere garantita.

- offre un buon isolamento acustico: l'indice ha raggiunto 50 dB di isolamento acustico;
- possiede una conduttività termica pari a 0,216 W/(mk);
- resiste all'accumulo di alogeni e mantiene la propria solidità;
- non teme il gelo (non mostra tracce di danneggiamento dopo 25 cicli dicongelamento/ scongelamento) (può essere utilizzato per le pareti e i soffitti di celle frigorifere a temperature inferiori a -40°);
- può essere ricoperto con rivestimenti di ogni genere o verniciato a spruzzo;
- è facile da tagliare, segare o inchiodare;
- non contiene sostanze tossiche di nessun genere (tra cui amianto, formaldeide,ammoniaca ecc.).

Per ulteriori informazioni riguardo l'utilizzo, i certificati, le installazioni e le possibili applicazioni di questo nuovo pannello ecologico è possibile consultare il sito intenet.

4.2.6.3 Equilibrium Wo Ties

Stratigrafia: intonaco traspirante in sabbia e calce - Biomattone Equilibrium in canapa e calce spessore 15 cm - Canafloc in fibra di canapa sfusa spessore 18 cm - Biomattone Equilibrium in canapa e calce spessore 10 cm - intonaco traspirante in sabbia e calce (K totale = 0.13 W/m^2K) Sfasamento termico 16h (foto sottostante). Coefficiente di assorbimento acustico: 0,8, i.a.a. 50dbi.

4.2.7 Sottofondi e massetti coibenti e alleggeriti, ecc

Calcecanapa è utilizzato per sottofondi isolanti di solai in legno e cemento. La flessibilità del composto è in grado di resistere alla deformazione del pavimento, limitando i rischi di deformazione. Inoltre, grazie alla bassa densità - probabilmente il valore più basso tra i vari calcestruzzi - l'uso di Calcecanapa nei sottofondi evita di sovracaricare le strutture (Ronchetti P., 2007).

.

4.2.8 Restauri

Per migliorare dal punto di vista dell'isolamento termo-acustico vecchie case in muratura di pietra l'utilizzo di questa soluzione di calce e canapa risulta molto efficace, adattandosi alle oscillazioni termiche e di umidità della muratura esistente (Ronchetti P., 2007).

4.2.9 Proprietà biocomposito di calce e canapa

Successivamente sono elencate e analizzate le proprietà di questo nuovo cemento biocomposito di calce e canapa che solo in questi ultimi 10 anni, attraverso una ricerca scientifica costante, sono state scoperte e analizzate al fine di trovare la più giusta collocazione di questo nuovo materiale nel settore dell'edilizia.

- **Isolamento termico ed inerzia termica:** Ricordando che più il valore di trasmittanza (U) è elevato più è scarsa la performance dell'edificio, i risultati del test condotto da BRE (2002) ad Haverhill su questo parametro nell'edificio costruito con il biocomposito era più alto di quello misurato in un edificio standard. Nonostante ciò, la temperatura media interna nella struttura a canapa e calce è rimasta di 2° C più alta rispetto a quella riscontrata nell'edificio standard, pur avendo lo stesso consumo di combustibile durante il periodo. E' stato quindi concluso che il valore di U non è il metodo più appropriato per valutare la performance termico del cemento di calce e canapa. In base ai livelli misurati, i valori di U del biocomposito sono inferiori alla soglia attuale prevista dai regolamenti Britannici e Francesi. Con un muro spesso 300mm, il valore di trasmittanza misurato è di 0,3 W/m^2 K, di 0,22 W/m^2 K per 400 mm e di 0,18 W/m^2 K per 500 mm (Lime Technology, 2006). Inoltre in un secondo rapporto redatto da BRE (2003) consistente in una ispezione termografica risulta che è stata rilevata una temperatura esterna dell'edificio di canapa e calce di circa 5°C inferiore a quella dell'edificio standard. Il biocomposito elimina perciò ogni forma di ponte termico isolando completamente la struttura portante in legno. Inoltre la costruzione si è dimostrata essere a tenuta d'aria, evitando così ogni perdita di calore dall'interno.
L'inerzia termica è la capacità di un materiale di conservare energia calorifica e di rilasciarla su un periodo più lungo di tempo. Périer (2001) riconosce in questa proprietà la capacità del cemento biocomposito di controllare le differenze di temperatura e quindi di aiutare a rendere l'edificio più confortevole. In poche parole quando il cemento in calce e canapa viene esposto al sole si scalda in modo limitato e quando la temperatura esterna scende è in grado di rilasciare il calore bilanciando la differenza di temperatura tra ambiente esterno ed interno, questa proprietà è confermata dal test di BRE ad Haverhill (2001) (Ronchetti P., 2007).

- **Respirabilità d edifici salubri:** Il biocomposito combina la permeabilità al vapore della calce all'igroscopicità della canapa, vale a dire la capacità del canapulo di assorbire elevate quantità di vapore acqueo. I muri ed i pavimenti di un edificio a canapa e calce possono "respirare" assorbendo l'umidità e successivamente rilasciandola attraverso l'evaporazione. Questa caratteristica evita lo sviluppo di umidità ed il relativo deterioramento all'interno del materiale favorendo la riduzione la quotidiana dell' umidità relativa. L'effetto complessivo è un ambiente più salubre e naturale che necessita di un minore condizionamento dell'aria (Ronchetti P., 2007).

- **Sequestro di carbonio:** La pianta di canapa assorbe diossido di carbonio durante la sua crescita. Secondo Pervais (2003) 325 kg di CO_2 vengono catturati in una tonnellata di canapa secca. La costruzione a base di calce e canapa è quindi una modalità efficace per contrastare il riscaldamento

globale. Lime Technology (2006) afferma che vengono sequestrati 110 kg di CO_2 /m^3 nell'edificio quando il biocomposito viene spruzzato, che diventano 165 kg di CO_2 /m^3 quando viene gettato e pressato all'interno dei pannelli temporanei di contenimento. Le stime citate tengono conto delle emissioni di biossido di carbonio per la produzione della calce. Per questo motivo si può affermare che la costruzione a base di calce e canapa è potenzialmente ad emissioni negative. Inoltre ulteriori risparmi di emissioni di CO_2 sono una conseguenza diretta della performance termica della costruzione a canapa e calce che riduce il fabbisogno per il riscaldamento dell'edificio. Ulteriori approfondimenti, riguardo il valore di emissioni di CO_2 ed impatti ambientali del cemento di calce e canapa verranno discussi nel prossimo capitolo (Ronchetti P., 2007).

- Isolamento acustico: Sempre secondo il rapporto della BRE, i test acustici hanno avuto una performance inferiore rispetto a quelli costruiti con metodi tradizionale, ma nonostante ciò hanno soddisfatto i requisiti di resistenza acustica (Ronchetti P., 2007).

- **Resistenza antincendio**: Il biocomposito in calce e canapa è ignifugo senza l'aggiunta di ulteriori sostanze tossiche ritardanti di fiamma. Périer (2001) afferma che secondo i test condotti dal "Centre Scientifique et Technique du Batiment" il biocomposito è stato classificato come "resistente alla fiamma" senza rilascio di fumi tossici o D-infiammabili, nella categoria francese M1. Viene inoltre affermato che la miscela abbia resistito un test di quattro ore a temperatura superiore a 1800°C (Ronchetti P., 2007).

- Protezione dalle infestazioni: La canapa non é appetibile a topi e ratti, i quali non sono nemmeno attratti dalla calce che é stata utilizza in passato per mantenere i livelli di igiene (Ronchetti P., 2007).

4.3 La miscela

Come detto in precedenza la miscela del biocomposito è un mix di tre ingredienti, ovvero: la calce che funge da legante, il canapulo che ne da la consistenza e infine l'acqua che assicura la reazione chimica tra il legante e la canapa oltre a rendere la miscela fluida e facilmente lavorabile;

esattamente l’opposto della maggior parte dei materiali isolanti. La fluidità della miscela consente al materiale di adattarsi alla superficie alla quale viene applicata, di entrare in ogni angolo ed interstizio, di essere livellato e compattato, in modo da assicurare una perfetta barriera all’aria una volta asciugato e indurito. La possibilità che la miscela possa essere formata e usata in diversi modi (per es. quantità di legante e spessore) fa si che il prodotto possa soddisfare diverse esigenze. La miscela di canapa con un basso contenuto di legante ha una migliore capacità di isolamento termico, ma una volta indurita deve essere sostenuta (tetti e interstizi di muri). Con l’aggiunta di una maggiore quantità di legante, la miscela diventa più densa e autoportante, e può essere usata per formare muratura di tamponamento o isolamento di pavimenti.

4.3.1 La miscelazione

La miscela viene preparata con un miscelatore orizzontale o betoniera da cantiere. La betoniera viene solitamente usata quando lo spazio a disposizione è limitato. Il miscelatore orizzontale ha una capacità di carico maggiore e produce una miscela migliore. Il processo di miscelazione è molto importante per una corretta prestazione del composto una volta applicato. Il canapulo deve essere prima bagnato. Successivamente viene aggiunto il legante così da formare uno strato uniforme di calce attorno ad ogni singolo pezzetto di canapa. Durante il processo tendono a formarsi palle e grumi nel composto. E’quindi importante che vengano seguite correttamente le istruzioni e che la miscela venga aggiustata con acqua così da ottenere un prodotto finale omogeneo

Il processo di miscelazione deve essere effettuato nel seguente modo:

Gettare il canapulo nel miscelatore e aggiungere acqua - mezzo sacco di canapa (10kg) richiede circa 20 litri di acqua. Miscelare per 2-3 minuti. La canapa assorbirà l’acqua velocemente e diventerà leggermente umida. A questo punto aggiungere il legante lentamente e lasciare miscelare per 3-4 minuti. Infine aggiungere acqua se necessario a seconda delle condizioni atmosferiche.

Regole principali:

- Il prodotto finale deve essere umido ma non bagnato.
- La quantità di acqua varia a seconda della temperatura dell’aria – solitamente viene utilizzata più acqua nelle ore pomeridiane rispetto a quelle mattutine.

- Per testare il corretto contenuto d'acqua, prendere una manciata del prodotto finito, comprimere leggermente e riaprire la mano. Se la miscela rimane compatta come una palla il contenuto d'acqua è troppo elevato, se la miscela si sgretola il suo contenuto è troppo basso. Quando la miscela si espande leggermente il contenuto d'acqua è corretto.
- Il bisogno d'acqua varia a seconda delle proporzioni di legante usato.
- Quando viene utilizzata una betoniera è consigliato svuotare il legante in una carriola e caricare il miscelatore con un badile.
- Il miscelatore orizzontale viene caricato dall'alto.
- Al termine della miscelazione i macchinari devono essere abbondantemente risciacquati. Eventuali grumi di legante formatisi sulle braccia del miscelatore devono essere rimossi.

Quando le condizioni metereologiche e il tempo a disposizione lo permettono è consigliabile svuotare l'impasto di canapa (anche diversi carichi) su un foglio di cellophane, spargerlo con un rastrello e lasciarlo evaporare per un'ora o due prima dell'applicazione.

4.4 Canapa e canapulo

4.4.1 La pianta di canapa

La canapa (Cannabis, L. 1753) è una pianta a fiore che appartiene all'ordine "Urticales", alla famiglia "Cannabaceae" cioè delle Cannabinacee, annuale e in natura dioica, il che significa che nella sua popolazione si trovano più o meno al 50 per cento esemplari che portano solo fiori femminili, che portano i semi, ed altrettanti esemplari che portano solo fiori maschili, che producono solo polline (si parla di piante maschio e piante femmina). Popolazione molto variabile, presenta soggetti con caratteri molto diversi tra di loro e una classificazione è stata quanto mai complessa, fin dalle origini. La maggior parte dei botanici segue la classificazione di D.E. Janichewsky (1924), un botanico sovietico che studiò vari esemplari di piante selvatiche e classificò la canapa in tre diverse specie:

· Cannabis Sativa

· Cannabis Indica

· Cannabis Ruderalis.

Nel 1753, Linneo parlò invece esclusivamente di Cannabis Sativa e la sua tesi fu confermata dai canadesi Small e Cronquist nel 1976, che in una proposta di classificazione alternativa a quella dello studioso sovietico, affermarono che esiste una sola specie molto variabile che presenta due sottospecie:

- una nordica usata per fibra e olio
- una meridionale tipica dei paesi caldi e ricca di resina e THC.

Approfittando della variabilità della canapa, l'uomo ne ha creato, con un'adeguata selezione, tante varietà: da fibra, da seme e da uso farmaceutico. La pianta di canapa presenta un fusto eretto la cui altezza può variare da 1 a 4/5 metri in media, a seconda della varietà, delle condizioni pedologiche e climatiche e delle densità di semina. La sezione del fusto può variare da pochi millimetri ad alcuni centimetri ed è formata da una parte interna di tipo legnoso, il "canapulo", di colore bianco e molto leggera, avvolto dal tiglio, una corteccia esterna di colore verde, che costituisce la parte fibrosa tenuta insieme da pectine. Il canapulo rappresenta circa il 0-75% del totale ed è costituito per un 77% da cellulosa e per il 20% da lignina; mentre la fibra rappresenta circa il 25-30% del fusto ed è costituita per la maggior parte da cellulosa e per un 6% da lignina.

Più la pianta è grossa, più la fibra sarà grossolana e robusta. Nella stessa pianta la fibra è più grossa verso la radice e più fine verso la cima. Per quanto riguarda l'apparato fogliare, troviamo foglie su ciascun nodo del fusto, ed esse sono prevalentemente opposte, picciolate, palmate, composte da 5-13 segmenti lanceolati, a margine dentato-seghettato, con punte acuminate, fino a 10 cm di lunghezza ed 1,5 di larghezza. Salvo rari casi di ermafroditismo, le piante di canapa sono dioiche e i fiori unisessuali crescono su individui di sesso diverso. Le infiorescenze maschili (staminiferi) sono riunite in pannocchie terminali composte da numerosi tepali fusi alla base e costituiti da 5 pezzi (stami). Si sviluppano almeno 60 giorni dopo la germinazioni. Le infiorescenze femminili (pistilliferi) invece si formano sulle cime una decina di giorni dopo quelle maschili e assumono la forma a falsa spiga, grossa, dritta e a ciuffo, molto più compatta di quella maschile. Sono riunite in gruppi di 2-6 alle ascelle di brattee formanti corte spighe, ognuna delle quali mostra un calice membranaceo che avvolge strettamente un ovario supero ed uniloculare, sormontato da due stilli e due stimmi (Assocanapa, 2011). Sono proprio queste ultime che producono i semi, costituiti da un frutto secco detto achenio, di colore grigio verde e di forma ovoidale (3-5 mm di lunghezza, 2-3 mm di larghezza). Il peso di 1000 semi varia tra i 20-25 grammi, quindi per avere 200 piante per metro quadro occorrono circa 5 grammi di semente, corrispondenti a 50 kg per ettaro. Peculiarità della canapa è essere una cultura molto adattabile, che può essere coltivata in condizioni pedologiche e climatiche diverse, anche in collina e montagna fino a 1500 m. La germinazione del

seme avviene, a seconda della temperatura, in 5-10 giorni e la temperatura minima è fissata a 7-8 gradi. La pianta ha poi un accrescimento molto rapido e, con condizioni di suolo e tecniche colturali adeguate, il ciclo vegetativo si completa in 3-4 mesi. Per la canapicoltura, il terreno ideale, è un terreno molto profondo e privo di strati impermeabili, in modo da facilitare lo sviluppo dell'apparato radicale ed evitare i ristagni idrici, che risulterebbero letali per la vita della pianta. Sono preferibili i terreni sciolti, franco sabbiosi, torbosi. Risultano poco adatti invece i terreni argillosi, limosi e quelli dotati di scarsa sostanza organica che tendono a chiudersi quando ai periodi pioggia seguono periodi soleggiati e ventosi. Per garantire una buona riuscita della coltivazione, svolge un ruolo di primaria importanza la prima fase di lavorazione del terreno. Risaputo sin dall'antichità e confermato da recenti studi, la coltivazione della canapa migliora i terreni e i suoi rendimenti. La canapa è una tipica coltura primaverile da rinnovo che, se da un lato richiede un'accurata preparazione del terreno, dall'altro lascia una notevole fertilità residua nelle colture che si avvicendano. Infatti le piante che la seguono nella rotazione agraria si avvantaggiano dell'azione "ricostituente" e dell'importante massa di residui organici che lascia nel terreno. Si presta bene a favorire il ritorno delle rotazioni agrarie in quelle aree particolarmente soggette agli squilibri provocati dalle monocolture. Il miglioramento viene attribuito per lo più a diversi fattori; primo fra tutti l'apporto di nutrienti dovuto alle foglie cadute che restituiscono la sostanza organica prelevata durante la fase di crescita nelle zone più profonde del terreno raggiunte dall'apparato radicale (azione contro la desertificazione). Le radici fittonanti della canapa svolgono anche azione meccanica che serve da prima movimentazione del terreno e la presenza nella pianta stessa di sostanze con proprietà battericide/insetticide fa si che svolga in maniera autonoma funzione autodiserbante e antiparassitaria. La canapa inoltre protegge i terreni dal dilavamento e, durante la fase vegetativa (primavera/estate/autunno), trattiene notevoli quantità di azoto prelevato dal terreno impedendone il percolamento in falda. La coltivazione della canapa può costituire una valida alternativa al grano nei terreni poco fertili ed asciutti, a condizione però che i costi di trasporto siano contenuti e che quindi la lavorazione venga effettuata in prossimità delle zone di coltivazione. I costi di produzione sono più alti in quanto influenzati dal costo del seme e dalle più laboriose operazioni di raccolta, ma la quantità di raccolto può raggiungere dimensioni tali da rendere più favorevole il conto economico della canapa.

Di seguito, in fig.6, è riportato uno schema che rappresenta le fasi di coltivazione/lavorazione della canapa

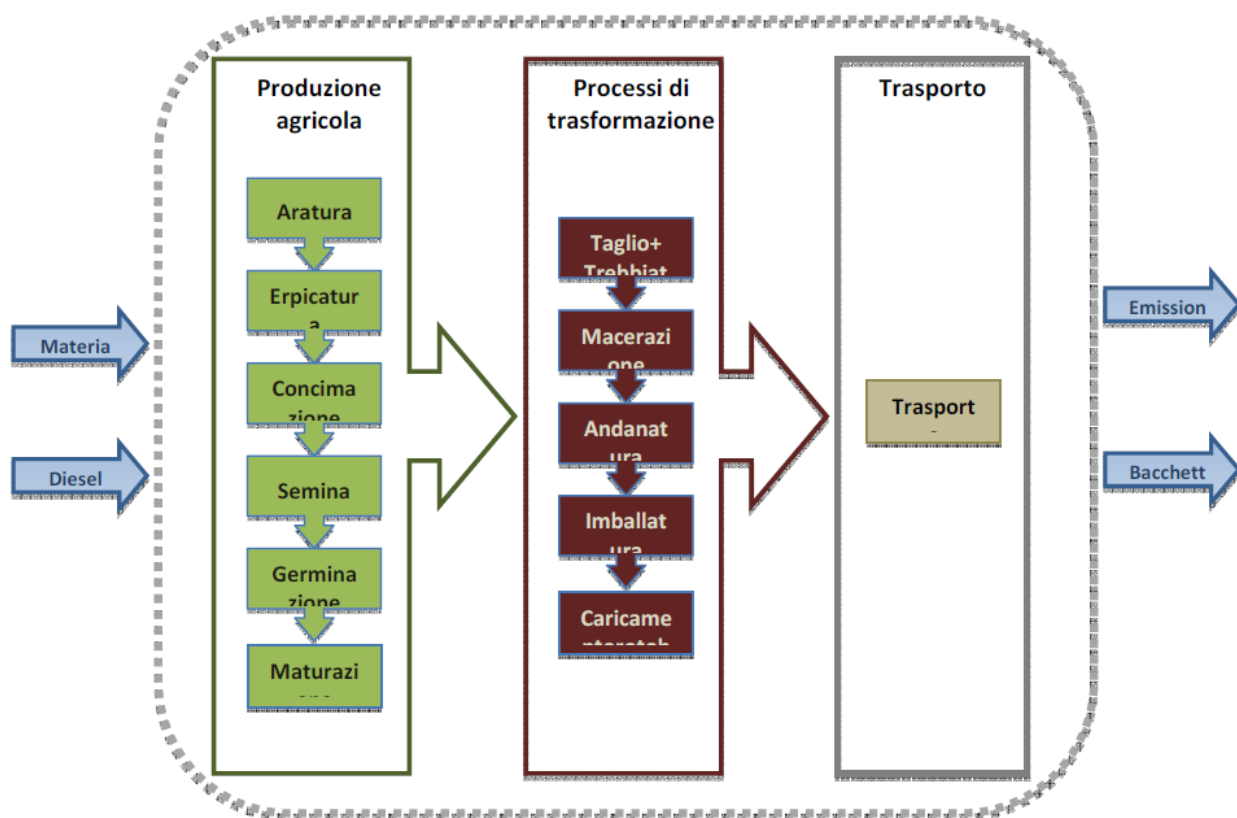



FIG-6 FASE DI COLTIVAZIONE DELLA CANAPA

A livello industriale, la canapa rappresenta un interessante punto di vista delle risorse vegetali, in armonia con i principi dello sviluppo sostenibile, come fonte alternativa di materie prime e valorizzazione dell'energia e della biomassa. Poiché ha una elevatissima produzione di biomassa annuale e un forte assorbimento di CO_2 dall'atmosfera, tutto ciò permette un bilancio complessivo negativo delle emissioni di CO_2 dei sistemi di isolamento: la quantità di CO_2 catturata e sequestrata è superiore a quella emessa durante il ciclo di vita del materiale. La canapa si coltiva e raccoglie nell'arco di 4-5 mesi durante i quali come tutte le piante assorbe CO_2 tramite fotosintesi dall'atmosfera rilasciando ossigeno e accumulando carbonio (legno), inoltre la lavorazione della pianta per produrre la fibra tecnica o 'canapulo' non richiede eccessivo consumo di energia. La biomassa prodotta è l'equivalente di quella che un albero è in grado di sviluppare mediamente in 4 anni, con pari proporzione per la quantità di CO_2 sequestrata dall'atmosfera. Utilizzare il truciolato di canapa in edilizia significa quindi non restituire all'atmosfera il carbonio e avere il primo materiale da costruzione con impronta di carbonio negativa. Un'altra importate proprietà della canapa è la igroscopicità, ovvero la capacità di trattenere l'umidità. È inoltre inattaccabile da acari, muffe, funghi e tarme. La canapa ha un vastissimo campo di possibili utilizzi, e secondo alcuni

ricercatori è la risorsa naturale di maggior valore e più versatile del mondo. Può essere utilizzata in diversi settori in funzione della forma in cui è presente. Attualmente i prodotti semilavorati per la commercializzazione che si possono ottenere sono quattro, da cui possono derivare un gran numero di prodotti finali di cui i più importanti sono riportati in tabella 1:

TABELLA 1

Fibra lunga	Tessuti per abbigliamento, arredamento, corde, tappeti
Fibra corta	Carta, feltri isolanti, geotessili, compositi
Canapulo	Pannelli isolanti, materiale inerte per edilizia, lettiere
Semi	Olio alimentare,cosmetica, vernici, resine

L'utilizzo più diffuso in Europa sembra essere quello cartario, che trasforma la fibra corta in pasta di cellulosa e contribuirebbe in modo significativo alla difesa del patrimonio forestale presente sul pianeta. Inoltre la canapa, con il suo avvento nel campo edile, rappresenta una valida alternativa alla produzione di materiali altamente tossici per l'uomo (lana di vetro, amianto) o dannosi per l'ambiente (vernici, materiali inerti da cave). In figura 7 qui sotto vengono schematizzati i possibili utilizzi della canapa.

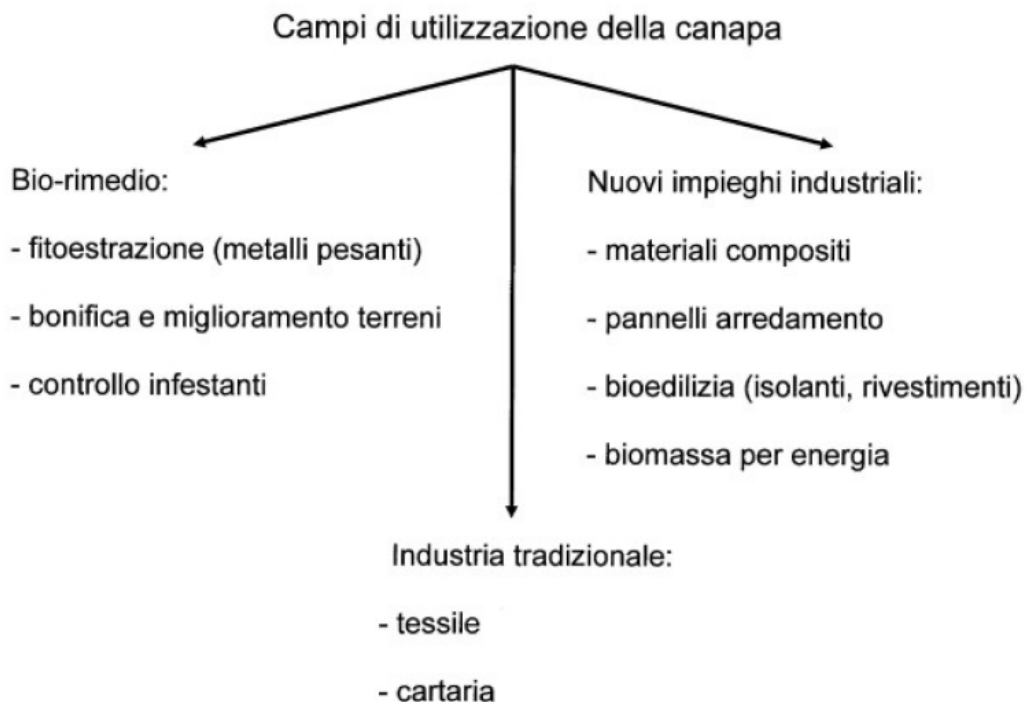



FIG-7 POSSIBILI UTILIZZI DELLA CANAPA

La classificazione dei diversi usi possibili della canapa è stata stilata da Assocanapa.
La nostra attenzione è rivolta in particolare all'utilizzo delle fibre di canapa perché il canapulo appartiene a questa porzione della pianta.

4.4.1.1 Fibre

- Fibra lunga macerata di pregio per filatura ad umido:
- o tessuti, abbigliamento, arredo casa, calzature, accessori, tele per dipinti

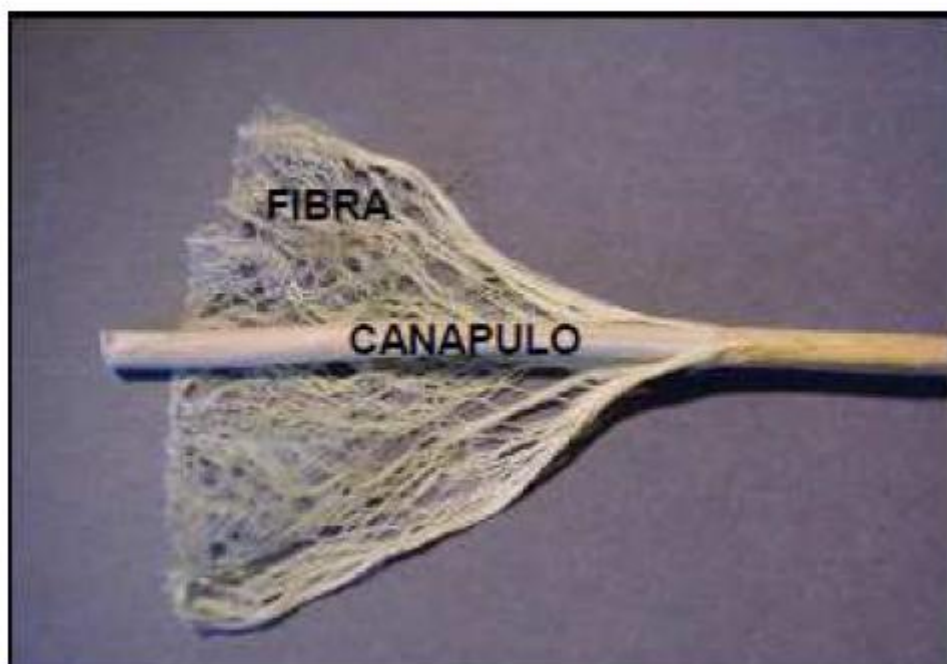
- Fibra lunga macerata meno pregiata
- o cordami anche per arredamento
- o reti, sacchi
- o teloni, tessuti per rinforzo plastiche petrolchimiche in sostituzione lana di vetro (imbarcazioni),rinforzo PLA
- o rista per avvolgimento tubazioni fibra corta macerata derivante da scarto della pettinatura della fibra lunga
- o filati per tappeti e maglieria
- o imbottitura materassi
- o pasta di cellulosa per carte speciali (tipo carta moneta e carta dei titoli di stato)
- o pasta di cellulosa per cartine sigarette
- o cartoni e imballaggi
- o pannolini
- o blocchi stampati in pressofusione
- o guarnizioni per i freni

- Fibra corta semimacerata:
- o pannelli isolanti e fonoassorbenti per edilizia, termosaldati con poliestere, amido di patate
- o geotessili per pacciamature
- o imbottiture per auto

- Canapulo:
- o intonaci e cappotti isolanti per edifici, blocchi da costruzione costituiti da canapa e calce
- o mangimi per ruminanti
- o lettiere per cavalli e piccoli animali

o pannelli rigidi per interno auto (cruscotto)
o pannelli rigidi per fabbricazione mobili
o pellet/brichette di qualità
o materiale per disoleazione acque inquinate

4.4.2 Il contributo della canapa all'edilizia

Assocanapa è titolare di un contratto per la fornitura di fibra di canapa ad aziende leader nel settore della produzione di pannelli isolanti e di geotessili. Il prezzo dei pannelli in lana di canapa è una via di mezzo tra quello dei pannelli di lana di vetro e quello dei pannelli di sughero (Assocanapa, 2011). Nella foto sottostante è rappresentata una fotografia che mostra in dettaglio di una bacchetta di canapa aperta composta da fibra e canapulo

La fibra corta di canapa semimacerata in campo, più o meno pulita dal canapulo, viene utilizzate per produrre pannelli isolanti e fonoassorbenti di diverso spessore e densità. Data l'attuale scarsità di canapa, essa viene mescolata con altre fibre naturali (kenaf, iuta..). Per realizzare i pannelli le fibre vengono termosaldate con fibre di poliestere oppure con amido di patate o altri collanti naturali.
Il canapulo ha un potere si assorbimento dei liquidi circa 12 volte s paglia e 3,5 volte superiore al truciolo di legno e pari a 5 volte il suo peso. Mescolato con acqua e calce il canapulo (essendo

molto ricco di silice) subisce un processo di “carbonizzazione” nel quale il legno viene mineralizzato (trasformamato in pietra). Nei secoli passati il canapulo semplice o unito alla fibra ridotta in pezzi venivano impiegati come materiali da costruzione, mescolati con argilla o calce. Gli steli tal quale son utilizzati per strutture leggere, che venivano intonacate per creare soffitti e tramezzi. Nella formazione della miscela la granulometria delle parti costituenti il canapulo deve avere dimensioni comprese tra i 5 e 30mm in lunghezza, tra i 2 e 5mm in larghezza e completamente ripulita da foglie, fibre e polveri. Le fibre (corteccia) vengono rimosse tramite processo di separazione meccanica dove la parte legnosa viene triturata e sminuzzata in piccole parti. Il suo alto contenuto di silice lo rende particolarmente resistente agli agenti atmosferici, in particolar modo all’umidità. In questa forma “il tritato” è il componente ideale per la formazione di materiali d’isolamento e da costruzione. Sul mercato questo materiale è marchiato come “materiale da costruzione e isolamento”, da non confondersi con i materiali derivanti dalle fibre di canapa, i quali hanno una qualità inferiore e una gamma di applicazioni molto limitata.

4.5 Risultati di un LCA effettuati sul canapulo

Nella tesi di laurea di Valeria Vernelli Vernelli “Analisi LCA della coltivazione della canapa e suoi possibili utilizzi nel campo della bioedilizia” è stato svolto uno studio LCA con lo scopo di presentare i risultati emersi della coltivazione di canapa, analizzando il processo dalla fase di preparazione del terreno, per la semina al raccolto della pianta alla produzione dei due materiali finali (il canapulo e la fibra) che trovano utilizzo, come detto in precedenza, in molteplici settori edilizi. Sono state stimate così le emissioni di CO_2-equivalente in atmosfera derivanti dall’intero ciclo produttivo: dall’acquisizione delle materie prime fino alla produzione dei materiali finali,
non considerando il fine vita dei prodotti. I confini del sistema di questa analisi LCA nel suo complesso hanno seguito lo schema ”from cradle to gate” ovvero dalla culla al cancello, indicando in questo modo tutte le operazioni coinvolte nella coltivazione della pianta: dall’aratura alla semina, arrivando poi alla fase di taglio, di raccolta e di lavorazione finale che porta alla produzione di fibra tecnica e canapulo (fig. 8).

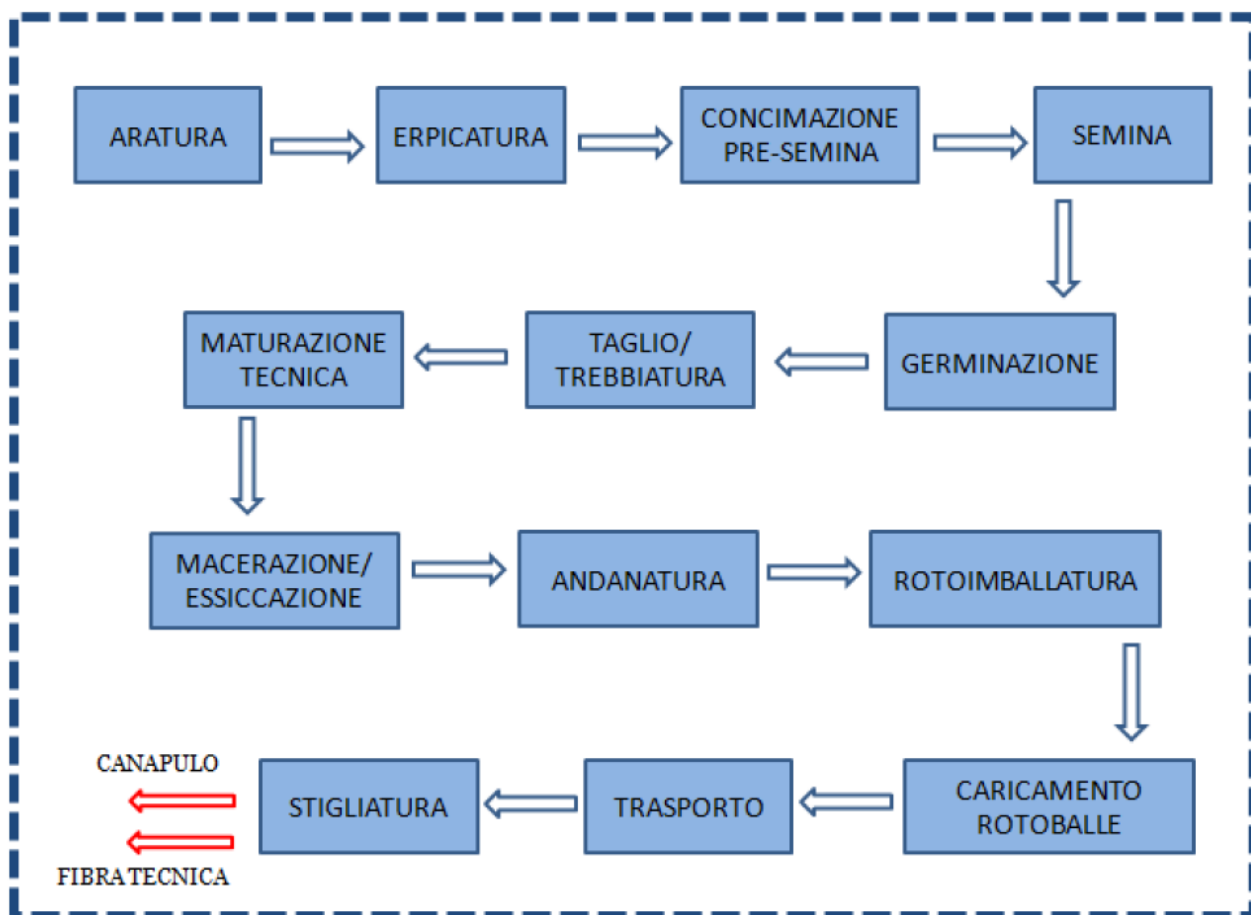



FIG-8 CONFINI DEL SISTEMA

Così riassumendo il processo di coltivazione della canapa inizia con la fase di semina e si conclude con la fase di stigliatura, metodo utilizzato per separare i due principali prodotti ottenuti dalle bacchette di canapa secca, ovvero il canapulo e la fibra tecnica.

Nello studio di LCA della canapa l'unità funzionale utilizzata è stata:

· per la prima parte dell'analisi l'ettaro di terreno coltivato a canapa (che ha una resa totale di 15 ton di bacchetta secca);

· successivamente, ovvero dopo la fase di trasporto, viene preso in considerazione invece il quantitativo di prodotto ottenuto, in uscita dalla fase di stigliatura e cioè 1 kg di fibra tecnica o 1 kg di canapulo. Per gli scopi della nostra tesi andiamo a riportare solo i valori degli impatti di 1 kg di canapulo. Inoltre è da evidenziare che nel caso della coltivazione della canapa, una tonnellata di canapa secca, all'uscita dall'impianto di prima trasformazione, in percentuale sarà distribuita come 75% di canapulo, 20% di fibra tecnica e un 5% di scarto, così come rappresentato in Figura 9:

FIG-9 PERCENTUALI IN USCITA DALL'IMPIANTO

Essendo un processo multifunzionale in cui sono presenti due diversi prodotti in uscita, canapulo e fibra tecnica sono stati definiti due diversi scenari allocativi, uno che prende in considerazione una grandezza fisica, ovvero la massa, e l'altro che invece considera l'aspetto economico, quindi il valore di mercato.

4.5.1 I risultati

Gli indicatori utilizzati nell'analisi per lo studio dell'impatto della coltivazione di un kg di canapa e dei suoi rilasci in ambiente sono:

· IPCC GWP 100;
· Cumulative Energy Demand;
· Ecoindicator 99.

Di seguito sono mostrati i grafici ottenuti in questa analisi per ogni tipo di indicatore relative solo al canapulo con allocazione in massa partendo dal IPCC GWP 100 ovvero l'indicatore che tiene conto delle emissioni di CO_2 equivalente :

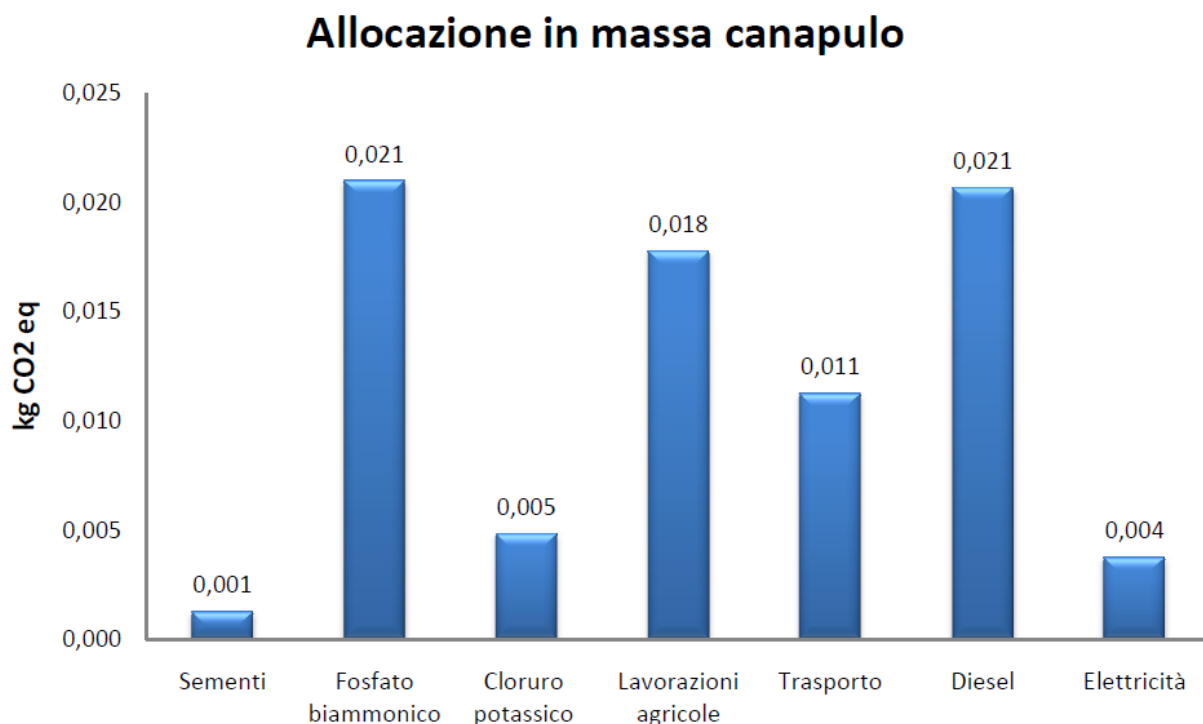



FIG-10 EMISSIONI DI CO2 EQUIVALENTI DI 1 KG DI CANAPULO NEL CASO DI ALLOCAZIONE IN MASSA

Si può notare, in figura 10, i valori maggiori sono riferiti all'uso del diesel e del fertilizzante (fosfato biammonico) e che siccome non sono inclusi i valori di CO_2 biogenica i dati sono tutti positivi. Come secondo indicatore è stato utililzzato la Cumulative Energy Demand poiché è ritenuto un indicatore qualificato quando si ha a che fare con materiali naturali utilizzati per edilizia e per questo è usato ferquentemente. In particolare, viene evidenziato il quantitativo di energia, rinnovabile e non rinnovabile, richiesta per l'ottenimento del prodotto finale e stoccata all'interno del prodotto.

Nella figura 11 sono messi a confronto i tre diversi tipi di allocazione presi in esame. Si può notare come ci sia una forte discrepanza nel caso dei risultati ottenuti con l'allocazione in massa per quanto riguarda il contributo di energia rinnovabile. Mentre nel caso dell'energia non rinnovabile i valori si mantengano su una stessa tendenza. Da evidenziare che per il valore di embolie energy si è fatto riferimento al valore del PCI del kenaf, fornito da Database Ecoinvent ovvero: 18 MJ/kg kenaf

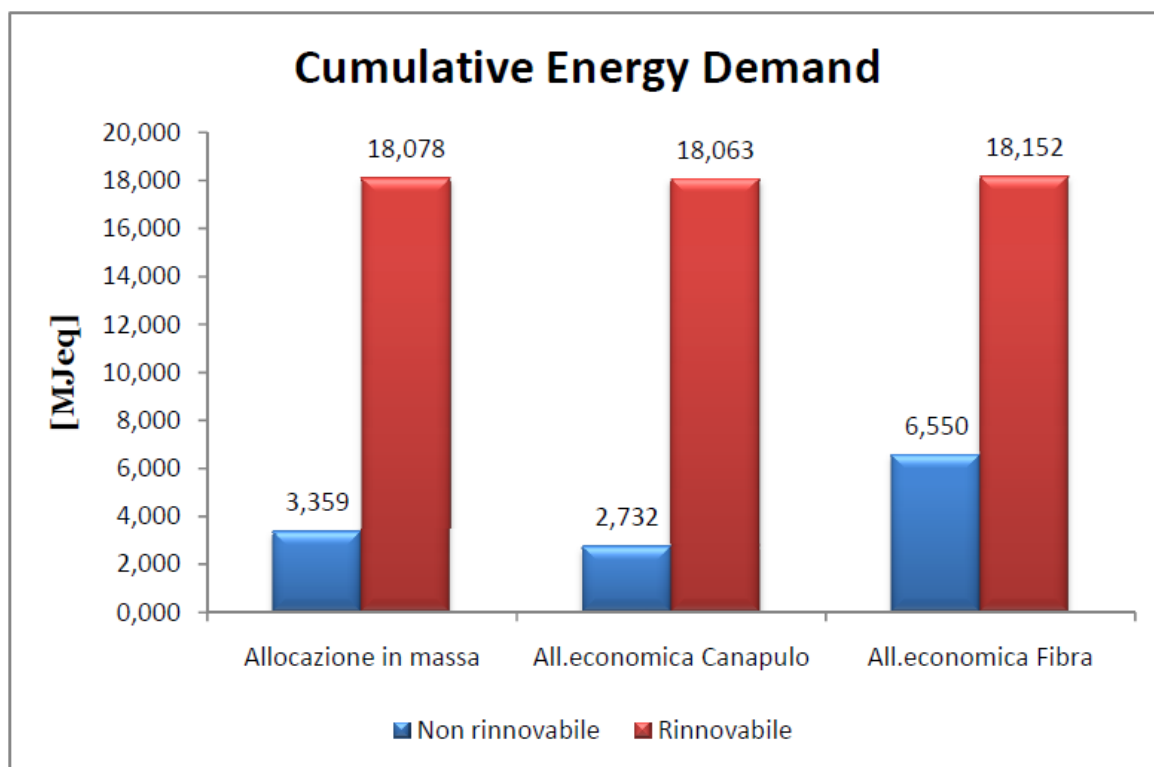



FIG-11 VALORI, IN MJ, PER TRE ALLOCAZIONI

Per quanto riguarda Ecoindicator99 i valori sono riferiti a ciascuna fase presente nel ciclo di vita della canapa ed è possibile notare, in figura 12, come anche in questo tipo di valutazione il diesel abbia un peso preponderante; altri contributi significativi sono le sementi e i fertilizzanti, seguiti dalle lavorazioni agricole.

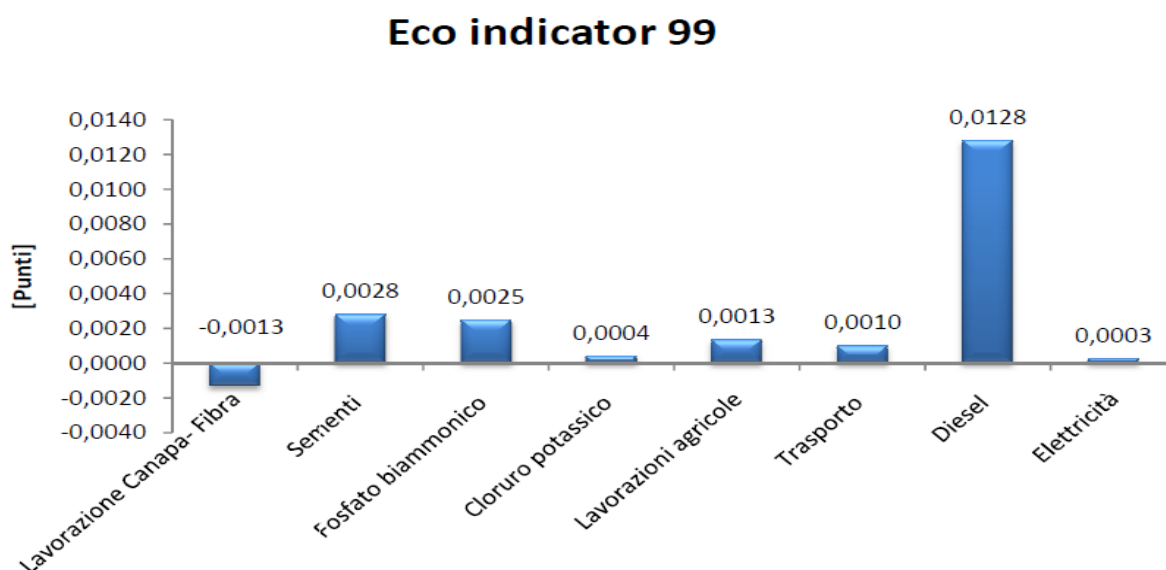



FIG-12 ECO INDICATOR 99 PER 1 KG DI CANAPULO O FIBRA TECNICA CON ALLOCAZIONE IN MASSA

Successivamente, in figura 13 è rappresentato il peso di ciascuna categoria d'impatto sul punteggio totale aggregato. E' da notare che risulta importante il contributo dato dai combustibili fossili, cancerogeni e inquinanti inorganici. I cambiamenti climatici ovviamente hanno un contributo negativo.

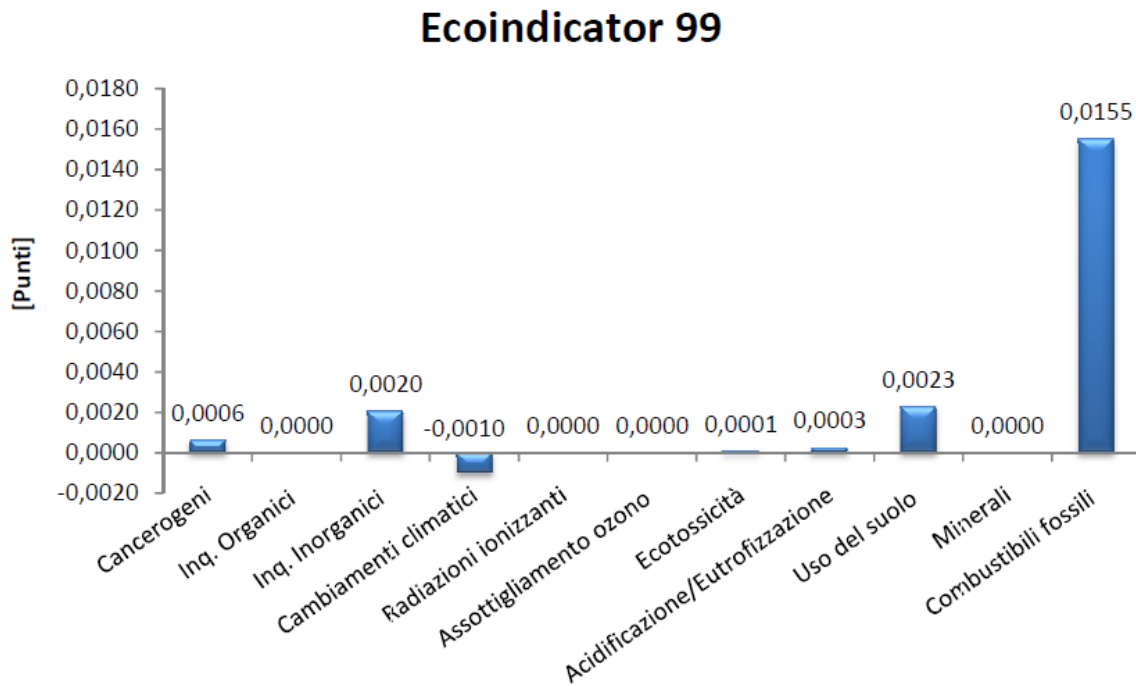



FIG-13 CATEGORIE D'IMPATTO DI ECO INDICATOR 99 PER 1 KG DI CANAPULO O FIBRA TECNICA CON ALLOCAZIONE IN MASSA

4.6 La calce

Come detto in precedenza la calce svolge un ruolo primario nella composizione del biocomposito, esso svolge il ruolo di legante ovvero serve per legare e tenere insieme i pezzi di canapulo, inoltre ogni miscela calce-canapulo può contenere una quantità differente di calce rispetto al canapulo. Perciò ogni miscela con un rapporto calce-canapa differente possiede proprietà fisiche ben distinte e quindi differenti utilizzi in edilizia. Nella nostra tesi trattiamo in modo particolare due prodotti del biocomposito: il biomattone e il Natural Beton (1:1 e 2:1): ovvero una miscela di calce e canapa con rapporto di 1kg di calce e 1kg di canapulo, per il NB 1:1, e una miscela, per il biomattone da 25 cm di spessore e il NB 2:1, con un rapporto di 2 kg di calce e 1 kg di canapulo. Come vedremo nel capitolo successivo, per il Natural Beton (1:1 e 2:1), non solo è differente l'impatto ambientale di questi due prodotti, proprio per il differente dosaggio della calce, ma sono le differenti applicazioni di utilizzo in edilizia a evidenziare l'importanza e a discriminare l'uso di un prodotto rispetto ad un altro. Inoltre un'altra funzione della calce è quella di cristalizzare il canapulo indurendolo e solidificandolo. In questo modo il canapulo è protetto da ogni azione di marcescenza oltre a diventare ignifugo una volta miscelato con calce e acqua. La miscela cosi viene protetta dalla possibilità di decomporsi, di incendiarsi o di essere aggredita da insetti o roditori; la rende capace, inoltre, di sanificare gli ambienti attraverso la sterilizzazione del vapore acqueo che fuoriesce durante il processo di respirazione.

In commercio esistono differenti leganti, tra questi solo alcuni sono idonei per la produzione della miscela di canapa. Gli ingredienti principali sono:

- Calce idrata
- Calce idraulica
- Pozzolana e altre sabbie vulcaniche
- Gesso o mattoni tritati

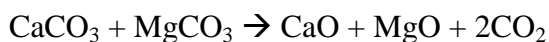
Ogni ingrediente ha una propria funzione e le loro proporzioni variano a seconda dell'uso. E' fondamentale che tutti i componenti siano naturali e che l'applicatore usi leganti approvati, forniti con i rilevanti dati tecnici.

4.6.1 Cos'è la calce

Con il termine calce si definiscono la calce viva e la calce spenta. La calce viva, o cotta, è ossido di calcio (CaO) o ossido di calcio e magnesio (CaO + MgO). La calce spenta è composta principalmente da idrossido di calcio ($Ca(OH)_2$) e comprende calce idrata (polvere essiccata di idrossido di calcio), latte di calce e grassello (dispersioni di particelle di idrossido di calcio nell'acqua). La calce è un materiale indispensabile per molti processi industriali come la produzione dell'acciaio, della carta, dello zucchero, come legante per l'edilizia e per la stabilizzazione delle terre nelle costruzioni stradali e ferroviarie. Si utilizza per applicazioni ambientali come la depurazione delle acque reflue e industriali, per la potabilizzazione delle acque e per l'agricoltura; inoltre la calce è usata per neutralizzare i componenti acidi delle emissioni e dei fumi industriali.

4.6.2 Il processo

Il processo di produzione della calce consiste nella cottura del carbonato di calcio o carbonato di calcio e magnesio a temperature di circa 900 °C, in modo da liberare anidride carbonica e ottenere l'ossido derivato secondo la seguente reazione:

$CaCO_3 + MgCO_3 \rightarrow CaO + MgO + 2CO_2$

L'ossido di calcio in uscita dal forno viene generalmente frantumato, macinato e/o separato prima di essere trasferito ai sili di stoccaggio oppure viene trasferita all'impianto di idratazione per ottenere la calce idrata. moderni processi di produzione della calce prevedono un funzionamento continuo dei forni. Il processo di produzione è composto dai seguenti sottoprocessi ed è descritto in figura 14:

- estrazione del calcare;
- stoccaggio e preparazione del calcare;
- stoccaggio e preparazione dei combustibili;
- calcinazione del calcare;
- trattamento della calce viva;
- idratazione e spegnimento della calce viva;
- stoccaggio, movimentazione e trasporto.

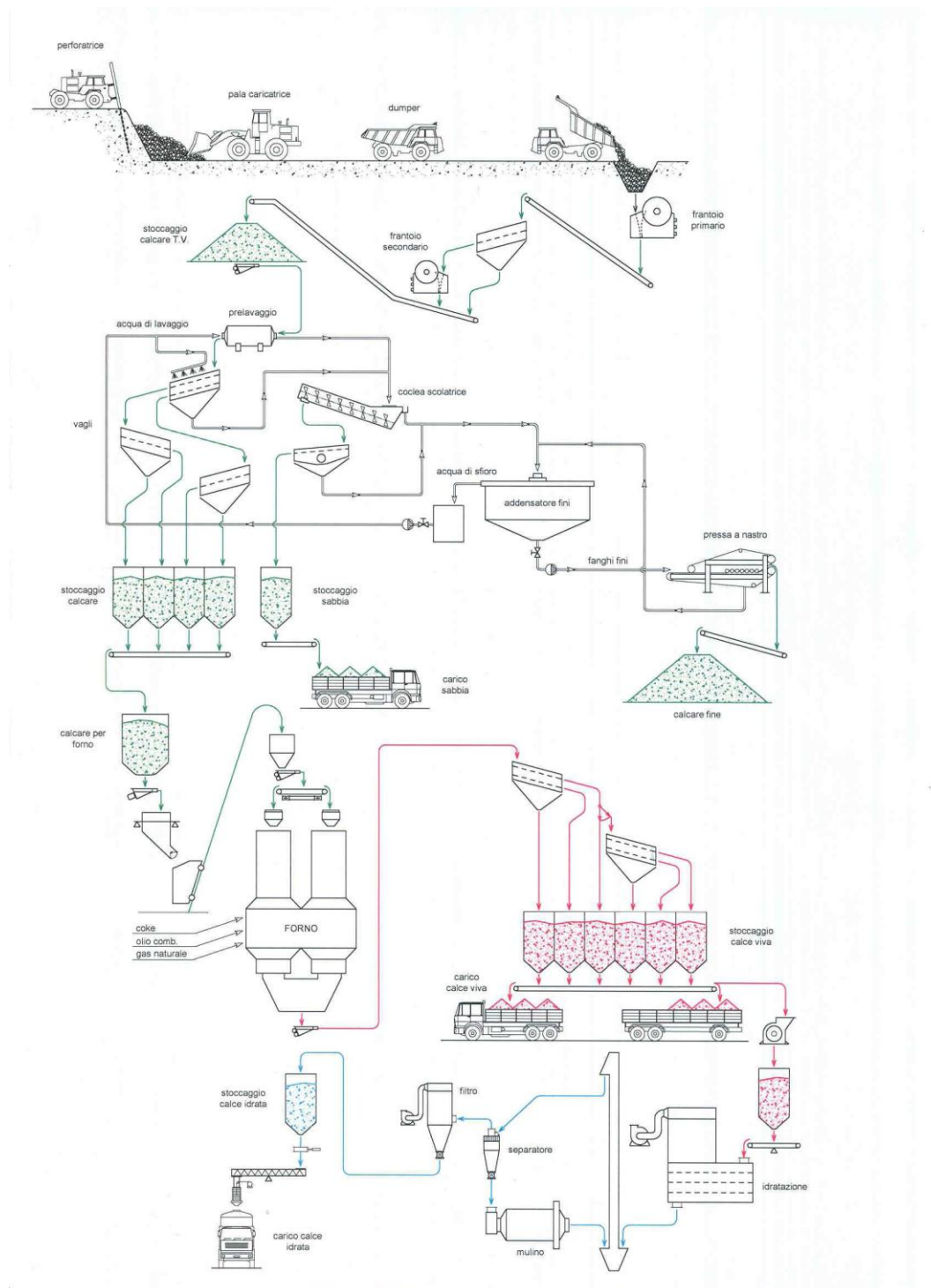



FIG-14 SCHEMA DEL PROCESSO DI PRODUZIONE DELLA CALCE

4.6.3 Estrazione del calcare

La materia prima per la fabbricazione della calce è il calcare o, in misura minore, la dolomite o il calcare dolomitico. La dolomite e il calcare dolomitico sono miscele di carbonato di calcio e di

magnesio (quest'ultimo in misura massima del 44%). Anche se i giacimenti di calcare sono relativamente abbondanti, solo una piccola parte è adatta per la produzione di calce perché sufficientemente pura. Il calcare o la dolomite vengono estratti, frantumati e in alcuni casi lavati; quindi vengono selezionati attraverso vagli e trasportati fino al forno. Il calcare si ottiene normalmente dalle cave a cielo aperto che si trovano usualmente in prossimità dell'impianto di produzione della calce, ma in alcuni casi può essere estratto anche tramite coltivazione in galleria. Il processo di estrazione prevede tipicamente:

- la rimozione dello strato di copertura/cappellaccio (ossia del terreno, dell'argilla e della roccia sciolta che copre il giacimento);
- l'abbattimento della roccia tramite esplosivi;
- il trasporto della roccia abbattuta con gli esplosivi agli impianti di frantumazione e vagliatura.

4.6.4 Preparazione e stoccaggio del calcare

Il calcare deve avere una distribuzione granulometrica compatibile con i requisiti del forno.

I frantoi primari ricevono blocchi di minerale (che possono raggiungere anche un metro di diametro) e li riducono a 100-250 mm. Dai frantoi primari, il calcare, attraverso un sistema di trasporto a nastri, raggiunge i vagli selezionatori. In questi ultimi, i pezzi più voluminosi vengono separati e rimessi in circolo per subire di nuovo l'intera procedura, mentre quelli che passano al vaglio vengono immessi nei frantoi secondari che si trovano più a valle.

I frantoi secondari frantumano il calcare fino al raggiungimento del fuso granulometrico adeguato al tipo di forno. Il materiale deve essere vagliato in modo da ottenere una distribuzione granulometrica che idealmente dovrebbe essere in un rapporto di 2 a 1 o almeno di 3 a 1 tra la pezzatura più grande e quella più piccola. I vagli selezionatori, posti a valle dei frantoi secondari, separano il calcare che va a costituire la carica del forno e che, tramite nastri trasportatori e/o elevatori a tazze, viene trasportato ai piazzali dove viene stoccato in cumuli all'aperto o in sili. La granulometria più utilizzata per la carica del forno è la 30-90 mm. Quando l'impianto è costituito da più forni usualmente si alimenta un forno con la pezzatura 20-40 mm, e l'altro con la pezzatura 40-100 mm. È ovviamente interesse del produttore utilizzare tutto il calcare possibile. In alcuni casi, quando l'impianto è costituito da un unico forno, si procede a caricare il forno alternativamente con uno strato a pezzatura piccola e uno strato a pezzatura più grande (sistema a sandwich). Il materiale più fino di 20 mm può essere utilizzato solo in forni con caratteristiche particolari. Tutto il materiale non idoneo (sottopezzatura) viene riutilizzato all'interno dell'impianto per realizzare altri prodotti oppure venduto ad industrie ed imprese di costruzione.

4.6.5 Stoccaggio e preparazione dei combustibili

Nei forni da calce si possono utilizzare diversi tipi di combustibile. In Italia il combustibile più diffuso è il gas naturale, ma trovano impiego anche carbone, olio pesante ed il polverino di legno.
Il gas naturale, da rete da media o alta pressione, viene utilizzato nei forni da calce a pressioni più basse. Esistono, di conseguenza, oltre alla cabina di misura fiscale, una o più stazioni di riduzione e controllo della pressione del gas. L'olio combustibile approvvigionato con autobotti viene scaricato in serbatoi di capacità adeguata. L'olio combustibile viene portato alla temperatura idonea a garantire una corretta viscosità e quindi pompato ai bruciatori attraverso tubazioni coibentate. Per scaldare l'olio combustibile si utilizzano caldaie a vapore o ad olio diatermico. Lo stoccaggio dei combustibili solidi è generalmente effettuato in piazzali prima di essere macinato o direttamente inviato all'impianto di combustione, quando già di pezzatura adeguata.

4.6.6 Calcinazione del calcare

Lo scambio di calore che si verifica nel processo di cottura della calce si può suddividere in tre fasi:
- Zona di preriscaldamento. Il calcare viene portato dalla temperatura ambiente a oltre 800 °C grazie al contatto diretto con i gas che lasciano la zona di calcinazione (vale a dire i prodotti della combustione, l'aria in eccesso e CO_2 derivanti dalla calcinazione);
- Zona di calcinazione. Il combustibile brucia nell'aria preriscaldata proveniente dalla zona di raffreddamento e (in funzione del tipo di forno) nell'aria di combustione che viene immessa con il combustibile. In questo modo si raggiunge una temperatura di oltre 900 °C, che causa la dissociazione del calcare in calce viva e anidride carbonica.
- Zona di raffreddamento. La calce viva che esce dalla zona di calcinazione si raffredda al contatto diretto con l'aria di raffreddamento. Nei forni a tino l'aria di raffreddamento, così preriscaldata, costituisce una quota dell'aria di combustione.

4.6.7 Lavorazioni secondarie della calce viva

La lavorazione della calce viva serve a produrre diverse qualità di materiale aventi la granulometria e le finezze richieste dai vari segmenti del mercato. A tale scopo si usano tutti o parte dei seguenti processi: macinazione, separazione, micronizzazione.

Un impianto per la lavorazione della calce che sia stato progettato correttamente raggiunge i seguenti obiettivi:

a) massimizzare la produzione dei prodotti principali;

b) minimizzare la produzione delle qualità eccedenti (in genere polveri fini);

c) migliorare la qualità di certi prodotti;

d) avere la flessibilità necessaria per variare la produzione in funzione della mutata domanda del mercato.

L'impianto di lavorazione dovrebbe avere un deposito adeguato, sia per i prodotti finiti che per quelli intermedi, in modo da disporre di scorte cuscinetto tra il forno, che funziona in continuo, e le spedizioni, che sono sospese durante la notte e nel week-end.

Il prodotto che esce dal forno viene macinato se di dimensioni non idonee ad essere direttamente immesso sul mercato. La calce frantumata viene quindi immessa in una linea di vagliatura a più livelli di separazione da cui si ottengono frazioni diverse in funzione del prodotto desiderato.

I prodotti più fini si ottengono, in genere, nei mulini tubolari e in quelli verticali a pista con rulli o sfere. In ogni caso un separatore ad aria è collocato sopra il mulino per controllare la finezza del prodotto e rimettere in circolo le particelle troppo voluminose. I prodotti sono stoccati in depositi dai quali possono essere spediti direttamente oppure trasferiti ad un altro impianto per essere macinati o idratati.

4.6.8 Idratazione e spegnimento della calce viva

Con il termine "calce spenta" vengono identificati diversi prodotti quali la calce idrata (polvere secca di idrossido di calcio), il latte di calce e il grassello (dispersioni di particelle di idrossido di calcio nell'acqua).

4.6.9 Produzione di calce idrata

L'idratazione della calce richiede l'aggiunta di acqua in un idratatore ($CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$). La quantità di acqua aggiunta è circa due volte l'importo stechiometrico richiesto per la reazione di idratazione. L'acqua in eccesso viene aggiunta per controllare con l'evaporazione, l'aumento di temperatura prodotta dal calore della reazione. Il vapore, carico di particolati, passa attraverso un filtro o uno scrubber per l'abbattimento delle polveri prima di essere scaricato in atmosfera.

L'idratatore è composto da più stadi con una o due pale controrotanti che agitano la calce in presenza di acqua. Ha luogo una forte reazione esotermica che sviluppa 1.140 kJ/kg di CaO. Il

tempo medio di reazione della calce nel reattore principale è di circa 15 minuti. La produzione di calore genera un'azione di ebollizione che crea un letto parzialmente fluido. La polvere viene trascinata dal vapore che si sviluppa durante il processo. Se la polvere viene abbattuta con uno scrubber a via umida si ottiene una sospensione di latte di calce, che viene di norma rinviata all'idratatore. Dopo l'idratazione, l'idrato viene trasferito ad un separatore ad aria, il quale separa le frazione grossolana dalla fine usando una corrente d'aria di ricircolo. Una parte, o tutta, la frazione grossolana può essere macinata e rimessa in circolo. Il prodotto finito viene trasportato ai sili di stoccaggio, dai quali può essere scaricato e trasportato come materiale sciolto oppure può essere inviato ad un impianto di imballaggio per essere confezionato in sacchi.

4.6.10 Produzione di latte di calce e di grassello

Il latte di calce e il grassello si ottengono "spegnendo" la calce viva con acqua in eccesso. Lo spegnimento si ottiene con apparecchiature discontinue o continue.
Con il termine latte di calce si definisce una sospensione fluida di calce idrata in acqua. Il latte di calce può contenere fino al 40% in peso di materiale solido. Il grassello è una dispersione densa di calce idrata in acqua. Tipicamente il grassello contiene il 55-70% in peso di materiale solido.

4.6.11 Produzione di calce idraulica

Le calci idrauliche naturali si ottengono da calcari silicei o argillosi contenenti più o meno silice, allumina e ferro. I livelli tipici in cui essi sono presenti nel calcare sono: SiO_2: 4-16%; Al_2O_3: 1-8%, e Fe_2O_3: 0,3-6%. Il contenuto di carbonato di calcio + carbonato di magnesio può variare dal 78 al 92%. Il calcare viene in genere calcinato nei forni a tino che devono essere tenuti sotto rigorosa sorveglianza per assicurare che la maggiore quantità possibile di silice e allumina partecipi alla reazione, senza provocare la sinterizzazione della calce libera. Le tipiche temperature di calcinazione sono 950-1250° C: la temperatura richiesta sale con l'indice di idraulicità (vale a dire passando da calce debolmente idraulica a fortemente idraulica). La calce calcinata è idratata con una quantità d'acqua sufficiente a convertire CaO libero in $Ca(OH)_2$. Se il tenore di CaO libero è maggiore del 10-15%, durante l'idratazione, la calce si polverizza finemente. Per tenori inferiori, la calce deve essere macinata prima di essere idratata. In ogni caso, può essere necessario macinare ulteriormente il prodotto idratato per ottenere il grado di finezza e la percentuale di presa richiesti. Calci idrauliche naturali "speciali" si producono mescolando calci idrauliche naturali in

polvere con materiali pozzolanici o idraulici in polvere. Calci idrauliche artificiali si ottengono, invece, dalla miscelazione di calci idrate in polvere con materiali pozzolanici o idraulici in polvere.
Da evidenziare in questo capitolo della nostra tesi che la calce, utilizzata per la produzione del cemento di calce e canapa, viene fornita dall'azienda UNICALCE, attraverso autocisterne, direttamente dallo stabilimento di Narni garantendo quella qualità e quel giusto dosaggio di "ingredienti" che la rendono adatta allo scopo prefissato e soddisfano le specifiche tecniche del biocomposito che l'azienda Equilibrium necessita per l'ottenimento di un prodotto ad alta qualità per accrescere comfort, benessere e risparmio energetico.

CAP. 5 LCA DEI PRODOTTI IN CALCE E CANAPULO

Una volta elencati tutti i materiali utilizzati per la produzione del cemento in calce e canapa non ci resta altro che affrontare lo studio LCA su questo materiale biocomposito, concentrandoci in particolar modo sulla produzione dei due prodotti più utilizzati da Equilibrium ovvero il biomattone ed il Natural Beton. Nel presente capitolo dapprima vengono elencate alcune proprietà e caratteristiche di entrambi i materiali studiati, in secondo luogo sono sintetizzati gli obiettivi, l'unità funzionale, e i confini dell'LCA e infine viene affrontato l'analisi di un ciclo di vita vero e proprio andando a svolgere la redazione dell'analisi di inventario e analizzandone, attraverso alcuni metodi di valutazione, gli impatti ambientali associati. Per questo studio è stata di fondamentale importanza la collaborazione dell'azienda Equilibrium e in particolare il contributo di Paolo Ronchetti e Luca Fratus, che con la loro partecipazione attiva in questo progetto ci hanno fornito i dati necessari per l'analisi d'inventario e le visite necessarie per la raccolta di immagini e informazioni riguardo la produzione di questi due prodotti.

5.1 Descrizione dei materiali utilizzati

Il Natural Beton (1:1 e 2:1) e il biomattone sono dei materiali isolanti massicci che combinano proprietà di isolamento e massa termica. Come detto in precedenza sono composti da calce idraulica naturale e legno di canapa (canapulo) miscelati con acqua. Rispettando i principi di sostenibilità sociale ed ambientale, hanno tutte le qualità richieste ad un materiale da costruzione in linea con uno sviluppo sostenibile ovvero:

- alta capacità isolante;
- bassa energia incorporata;
- capacità di assorbire CO_2 dall'atmosfera.

La produzione di Natural Beton (per brevità in seguito indicato con la sigla N.B.) e biomattone, viene effettuata con un procedimento 'a freddo' molto specifico, riducendo significativamente il consumo di energia. Di seguito sono elencate alcune caratteristiche, applicazioni e un elenco di dati tecnici dei tre materiali presi i considerazione.

5.1.1 Caratteristiche (comuni per tutti i materiali)

– Comfort termico, acustico ed igrometrico. Sono impermeabili al vapore acqueo.

– Resistente al fuoco, al gelo, ad insetti e roditori.

– Assenza di fumi tossici in caso di incendio.

– Basso consumo di energia durante la fabbricazione.

– Riciclabile e biodegradabile a fine del ciclo di vita.

Applicazioni N.B. 1:1 :

– Isolamento tetto e sottotetto.

– Costruzione di muratura isolante con casseri a perdere in magnesite e fibra vegetale.

– Isolamento esterno ‘a cappotto’ di edifici esistenti con cassero a perdere in magnesite e fibra vegetale.

– Isolamento interno di edifici esistenti con cassero a perdere in magnesite e fibra vegetale.

– Isolamento sottopavimento.

Posa in opera N.B. 1:1 :

– Miscelazione della canapa e della calce con aggiunta di acqua in miscelatrice o betoniera da cantiere.

– Formazione di casseratura con lastre in magnesite e fibra vegetale (murature o cappotto) o telaio in legno spesso 2 cm (tetto e sottotetto).

– Getto in opera del materiale.

– Le superfici esterne devono essere rivestite con intonachino colorato traspirante e/o calce.

Scheda dati tecnici N.B. 1:1 :

Spessore in cm	10	15	20	30	40
Densità in kg/m³	200	200	200	200	200
Conduttività termica in W/(mK)	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053
K Trasmittanza termica in W/(m²K)	0,53	0,35	0,26	0,17	0,13
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ)	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50
Calore specifico (J/kgK)	1500	1500	1500	1500	1500
Coefficiente di assorbimento acustico	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Indice di attenuazione acustica in dB	50	50	54	59	61
Energia incorporata MJ/m²	70	100	160	200	300
Sfasamento (secondo ISO 13786) in ore	4h15	7h22	10h30	14h45	17h45
Resistenza al fuoco Murature con Lastra in Magnesite tipo Megapan					
Incombustibilità	A1	A1	A1	A1	A1
	En13501-1	En13501-1	En13501-1	En13501-1	En13501-1
	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1

Applicazioni N.B. 2:1 :

– Costruzione di muratura isolante.

– Isolamento esterno ‘a cappotto’ di edifici esistenti.

– Isolamento interno di edifici esistenti.

– Isolamento sottopavimento.

– Vespaio areato.

– Partizioni interne ad isolamento acustico.

Posa in opera N.B. 2:1 :

– Miscelazione della canapa e della calce con aggiunta di acqua in miscelatrice o betoniera da cantiere.

– Formazione di casseratura con pannelli di legno.

– Getto in opera del materiale.

– Disarmo casseratura in legno (dopo circa 15 min dal getto).

– Le pareti interne e divisorie possono essere rivestite con malta di sabbia e calce, argilla o gesso. La posa di piastrelle a parete deve essere realizzata su uno strato a supporto di intonaco di sabbia e calce.

– Le superfici esterne devono essere rivestite con malta di sabbia e calce secondo le raccomandazioni dei produttori di intonaci a base di calce.

Scheda dati tecnici N.B. 2:1 :

Spessore in cm	10	15	20	30	40
Densità in kg/m^3	300	300	300	300	300
Conduttività termica in W/(mK)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
K Trasmittanza termica in W/(m^{2}K)	0,70	0,47	0,35	0,23	0,18
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ)	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
Calore specifico (J/kgK)	1700	1700	1700	1700	1700
Coefficiente di assorbimento acustico	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Indice di attenuazione acustica in dB	50	50	54	59	61
Reazione al fuoco con intonaco	M1	M1	M1	M1	M1
Resistenza al fuoco in ore (CSTB)				2	2
Energia incorporata MJ/m^2	100	150	200	300	400
Sfasamento (secondo ISO 13786) in ore	6h15	9h22	12h30	18h45	21h45

Applicazioni del biomattone:

– Costruzione di muratura isolante in abbinamento ad un telaio portante in legno.

– Isolamento esterno ‘a cappotto’ di edifici esistenti.

– Isolamento interno di edifici esistenti.

– Isolamento sottopavimento.

– Partizioni interne ad isolamento acustico.

Posa in opera del biomattone:

– La posa avviene incollando i blocchi con uno strato sottile di malta di sabbia e calce secondo il rapporto 1:1 (un volume di sabbia per un volume di calce NHL 3.5).

– Taglio con sega manuale a denti oppure elettrica.

– Le pareti interne e divisorie possono essere rivestite con malta di sabbia e calce, argilla o gesso. La posa di piastrelle a parete deve essere realizzata su uno strato a supporto di intonaco di sabbia e calce.
– Le superfici esterne devono essere rivestite con malta di sabbia e calce secondo le raccomandazioni dei produttori di intonaci a base di calce.

Scheda dati tecnici biomattone :

Spessore in cm	10	15	20	30	40
Densità in kg/m^3	300	300	300	300	300
Conduttività termica in W/(mK)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
K Trasmittanza termica in W/(m^{2}K)	0,80	0,53	0,40	0,27	0,20
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ)	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
Calore specifico (J/kgK)	1700	1700	1700	1700	1700
Coefficiente di assorbimento acustico	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Indice di attenuazione acustica in dB	29	34	39	49	59
Reazione al fuoco con intonaco	M1	M1	M1	M1	M1
Resistenza al fuoco in ore (CSTB)				2	2
Energia incorporata MJ/m^2	100	150	200	300	400
Sfasamento (secondo ISO 13786) in ore	6h15	9h22	12h30	18h45	21h45

5.2 Definizione degli scopi e degli obiettivi

L’obiettivo di questo studio è quello di valutare gli impatti complessivi di questi due prodotti a base di calce e canapa. L’analisi LCA, del biomattone e della miscela Natural Beton (1:1 e 2:1), fornisce una misura accurata dell’impatto ambientale del sistema di produzione tenendo conto di tutte le fasi del processo, dei trasporti delle materie prime e degli imballaggi utilizzati. In seguito a questa prima analisi sarà possibile individuare i processi più impattanti ed elaborare azioni più concrete atte a mitigare gli impatti ambientali dove possibile.

5.3 Unità funzionale e confini del sistema

L'**unità funzionale**, definita come una *"prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come riferimento in uno studio di LCA"*, rappresenta una unità di misura di riferimento a cui legare i flussi in entrata ed in uscita. La scelta di questo parametro dipende molto dal tipo di obiettivo dell'analisi. In questo studio LCA, poiché lo scopo è quello di valutare l'impatto derivato dalla produzione del materiale finale, come unità funzionale, per entrambi i prodotti, è stato scelto il kg di materiale fabbricato al cancello dell'azienda, quindi prodotto ed imballato. Per quanto riguarda i **confini del sistema** tradizionalmente la valutazione include l'intero ciclo di vita ("dalla culla alla tomba"), nel nostro caso però data la tipologia di materiale si è deciso di effettuare un LCA nella prospettiva "dalla culla al cancello" in cui si sono utilizzati dati primari per la parte relativa all'azienda che produce i materiali (dall'entrata all'uscita dell'azienda o "da cancello a cancello") e dati secondari per quanto riguarda la produzione delle materie utilizzate per la miscela del biocomposito in calce e canapa. In particolar modo gli impatti dovuti alla produzione in massa della calce sono direttamente estrapolati dal database di Simapro e inseriti come input in fase di miscelazione, come vedremo in seguito, e per il kg di canapulo, come visto nel capitolo precedente, abbiamo utilizzato, per gli impatti ambientali associati al processo di produzione, i dati forniti dalle tesi di Valeria Vernelli "Analisi LCA della coltivazione della canapa e suoi possibili utilizzi nel campo della bioedilizia". I processi di produzione di questi materiali hanno tutti come flusso di riferimento 1 kg di materiale lavorato.
Inoltre, la scelta della prospettiva "dalla culla al cancello" nasce anche dall'oggettiva scarsità di dati sperimentali riguardanti la messa in opera e lo smaltimento di opere edilizie con questi materiali che solo recentemente hanno iniziato a diffondersi in Europa. Per quanto riguarda le applicazioni dei prodotti edilizi nel capitolo successivo saranno analizzati alcuni pacchetti stratigrafici e confrontati con stratigrafie in muratura più classiche che utilizzano materiali naturali e sintetici. Nello studio di un ciclo di via di un prodotto il programma Simapro garantisce, in tutte le unità di processo, quella flessibilità necessaria per modificare l'unità funzionale, in quanto costruisce automaticamente la ricalibrazione di tutti i flussi a monte secondo le nuove disposizioni dell'utente; questo è possibile perché, in fase di inventario, per ogni unità di processo è scelto un appropriato *flusso di riferimento* sulla base del quale sono pesati i quantitativi di dati in ingresso ed in uscita all'unità di processo. Da notare infine che la calce ed il canapulo utilizzati per la miscela vengono prelevati da aziende lontane dalla sede dove si effettua il processo produttivo, perciò è stato necessario integrare agli impatti per la produzione di questi due materiali (calce e canapulo) l'impatto dovuto al trasporto e

agli imballaggi e, come vedremo in seguito, sono stati ipotizzati degli scenari alternativi che mitigano di molto l’impatto dovuto al trasporto dei materiali stessi.

5.4 Qualità dei dati

I dati su cui si costruisce una LCA sono raggruppabili in tre tipologie differenti di dato:

- Dati primari: provenienti da rilevamenti diretti;
- Dati secondari: ricavati da letteratura;
- Dati terziari: concepiti attraverso stime e valori medi statistici.

Ricordando quello scritto in precedenza, i requisiti di **qualità dei dati** dovrebbero comprendere:

- le fonti di dati e la loro rappresentatività;
- i fattori relativi al tempo, alla geografia e alla tecnologia;
- la precisione, completezza e rappresentatività dei dati;
- la coerenza e riproducibilità dei metodi usati nella LCA;
- l’incertezza dell’informazione.

Nel nostro caso di studio tutti i dati primari sono stati forniti dall’azienda che ci ha affiancato in questa analisi LCA. Nel dettaglio i dati forniti da essa sono:

- quantità di calce, acqua e canapulo per la miscela;
- mezzi di trasporto, distanze, quantità di materiale trasportato (scenari in ingresso);
- imballaggi per materiale in entrata ed uscita dall’azienda;
- consumi elettrici di tutti i macchinari utilizzati per il processo;
- tipologie e consumi macchinari di trasporto all’interno dell’azienda;
- tutte le applicazioni, le proprietà e le tipologie di utilizzi dei due prodotti applicati all’edilizia.

Sono da considerarsi dati secondari tutti quei dati mantenuti dalla banca dati Ecoinvent, necessari proprio nel momento in cui né le misurazioni dirette né la documentazione acquisita da Equilibrium sono in grado di fornire dati esaurienti per l’intero processo di produzione. Il database Ecoinvent ha consentito di eliminare questo limite fornendo dei processi di produzione standard assimilabili a

quelli dei materiali utilizzati da Equilibrium. Tra questi dati troviamo per esempio tutti gli impatti per la produzione della calce che detiene un ruolo decisamente importante per la produzione del biocomposito. Infine come dati terziari abbiamo utilizzato alcuni dati riferiti al consumo dei muletti.

5.5 Analisi di inventario

L'analisi di inventario (LCI, Life Cycle Inventory) è la fase più importante nel processo di LCA (Xing et al., 2008). Seguendo la definizione fornita dalla norma ISO 14040, è in questa fase che vengono *"individuati e quantificati i flussi in ingresso e in uscita da un sistema di prodotto, lungo tutta la sua vita"*. Tali flussi sono espressi in unità fisiche (unità di massa e di energia) e riguardano sia il prelievo e la preparazione delle materie prime, la loro trasformazione in prodotti finiti, co-prodotti, sottoprodotti con l'immissione di agenti inquinanti nell'aria, nell'acqua e nel suolo, sia il prelievo delle fonti di energia, il loro uso e i rilasci associati nei diversi comparti ambientali, nelle diverse fasi del sistema esaminato. Nel nostro caso di studio questa fase è stata la più impegnativa proprio perché abbiamo dovuto ricostruire nel dettaglio tutti i processi e le singole operazioni dell'intero ciclo di produzione del biomattone e della miscela. Il Simapro permette, per ogni processo, di integrare i dati primari a quelli secondari disponibili appunto nella banca dati, tutto chiaramente a nostra discrezione scegliendo e valutando, dopo aver analizzato la descrizione nella scheda "documentation", se la tipologia del processo da noi scelto è compatibile con le nostre esigenze. Questo procedimento consente di utilizzare e mantenere nel processo parametri di difficile determinazione, sfruttando l'accuratezza dei dati del database, come le emissioni dei macchinari di lavorazione o di trasporto, l'onere dei trasporti interni, la produzione di prodotti da materie prime (la calce), etc.

5.5.1 Trasporti e scenari in ingresso

Per la compilazione dell'analisi di inventario il primo passo è quello di descrivere il trasporto delle materie utilizzate per la produzione dei due prodotti in calce e canapa (fig. 1).

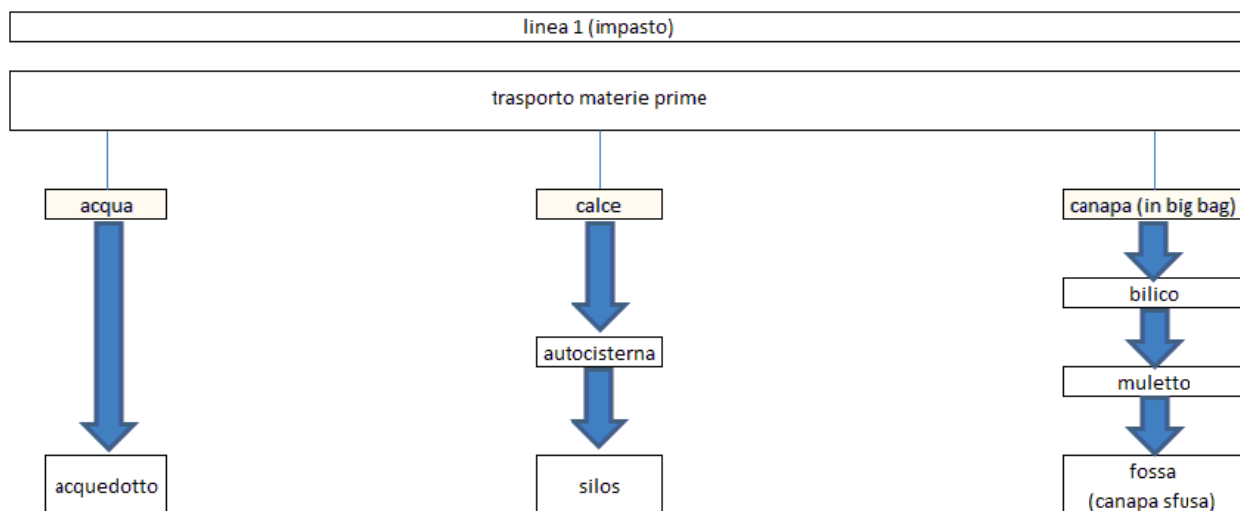



FIG-1 SCHEMA DEL TRASPORTO

La nostra attenzione è rivolta soprattutto alla calce che viene trasportata dalla cava situata nei pressi di Narni (TR), che dista circa 530 km dal cantiere Fratus di Castelli Calepio (BG), attraverso autocisterne per una quantità di circa 30 tonnellate. Di qui il consumo di circa 15990 ton*km (30 ton *530 km) che risulta essere il valore di input nel processo di trasporto sul Simapro. In secondo luogo c'è da valutare l'impatto per il trasporto del canapulo che viene fornito attraverso un bilico per un quantità di circa 5,2 tonnellate dalla sede di Assocanapa a Carmagnola (TO) che dista circa 250 km dal cantiere Fratus. Di qui il consumo di circa 1300 ton*km (5,2 ton *250 km) anche'esso inserito come dato input nel Simapro. Effettuata questa operazione sul Simapro si indica il tipo di veicolo. Nel nostro caso, per il trasporto del canapulo, si è scelto come mezzo di trasporto da Database Ecoinvent un trasporto su gomma EURO4 da 7.5-16 t, mentre per il trasporto della calce si è scelto come mezzo di trasporto da Database Ecoinvent un trasporto su gomma EURO4 da 16-32 t. Dopo questa operazione sono stati inseriti i dati input pocanzi citati. Il trasporto della calce ha un notevole impatto ambientale sull'intero processo di produzione, come vedremo in seguito, data l'enorme distanza che separa la cava di Narni dal cantiere Fratus. La sede di Narni è stata scelta, tra le tante di Unicalce, da Equilibrium per alcune proprietà presenti nel calcare di quelle zone che soddisfano varie caratteristiche fisiche e rendono questo legante davvero adatto per lo scopo prefissato. In alternativa abbiamo ipotizzato un altro scenario di trasporto della calce da un'altra sede di Unicalce, Brembilla (BG), che riduce notevolmente l'impatto dovuto al trasporto data la distanza davvero ridotta dal cantiere che è di circa 40km; il valore input nel Simapro è di 1320 ton*km (30 ton*40 km).

L'acqua utilizzata come ingrediente per il biocomposto viene prelevata dall'acquedotto, perciò ha impatto ambientale nullo nella fase di trasporto.

5.5.2 Imballaggi dei materiali in entrata all'azienda

Per quanto riguarda gli imballaggi che riguardano la calce e il canapulo in entrata all'azienda, possiamo considerare nulli gli impatti ambientali per il nostro studio LCA, in quanto la calce è trasportata attraverso autocisterne e, poiché non effettuiamo studi LCA riguardanti le macchine e le infrastrutture utilizzate nel processo, non rientrano in questa compilazione dell'inventario; stessa cosa per il canapulo in quanto questo materiale viene trasportato in Big Bag a rendere da 2 mc l'uno e pertanto l'impatto ambientale può essere considerato nullo. Chiaramente l'acqua essendo prelevata direttamente dall'acquedotto non ha impatti ambientali per questa fase.

5.5.3 Descrizione della fase di trasporto interno dei materiali

I due ingredienti principali per la miscela, calce e canapulo, dopo la fase di trasporto e prima della fase di miscelazione, vengono inseriti rispettivamente in un silos, ed in fosse arieggiate.
Per la fase di trasporto, del canapulo, dal bilico alla fossa viene utilizzato un muletto che consuma circa 1,06 kg di diesel per scaricare l'intero carico, di circa 5,2 ton. La calce invece viene direttamente scaricata nei silos e a questa operazione viene attribuito un consumo di diesel di circa 8,5 kg dovuto alla pompa dell'autocisterna. Quindi nel Simapro vengono inseriti i dati di consumo del diesel (in kg) (da Database Ecoinvent: Diesel, at regional storage/CH U) per le operazioni di scarico della canapa sfusa nelle fosse e lo scarico della calce nei silos validi per entrambi gli scenari in entrata dei materiali (calce e canapa).

5.5.4 Descrizione del processo di formazione della miscela in calce e canapa

Per effettuare l'analisi di inventario abbiamo deciso di riferirci ad un singolo ciclo di miscelazione, che corrisponde circa a 0,6 mc di biocomposito. I quantitativi in massa dei tre ingredienti (acqua, calce e canapulo) cambiano se si passa dal biomattone al Natural Beton 1:1 (rapporto in miscela calce-canapulo1:1, ovvero per 1 kg di calce si ha 1 kg di canapulo). Mentre per il Natural Beton 2:1 (rapporto in miscela calce-canapulo 2:1, ovvero per 2 kg di calce si ha 1 kg di canapulo) i dati input

della calce e del canapulo sono gli stessi del biomattone. Valore di consumo nullo abbiamo invece per l'acqua, in questa fase, poiché è inviata direttamente alla miscelatrice attraverso la tubazione dell'acquedotto. In realtà tutti gli impatti derivati dall'utilizzo dell'acqua dall'acquedotto sono calcolati direttamente dal software quando andiamo a selezionare la voce "Tap water, at user/RER U" dal Database Ecoinvent tra le materie prime utilizzate. Con questa selezione il Simapro inserisce direttamente nel calcolo tutti gli impatti ambientali prodotti dall'utilizzo del quantitativo di acqua utilizzato nel processo. Di seguito, in figura 2, è riportato un schema a blocchi che sintetizza le unità di processo a cui è sottoposta la miscela di calce-canapa impiegata per il N.B. 1:1 e 2:1 e per il biomattone.

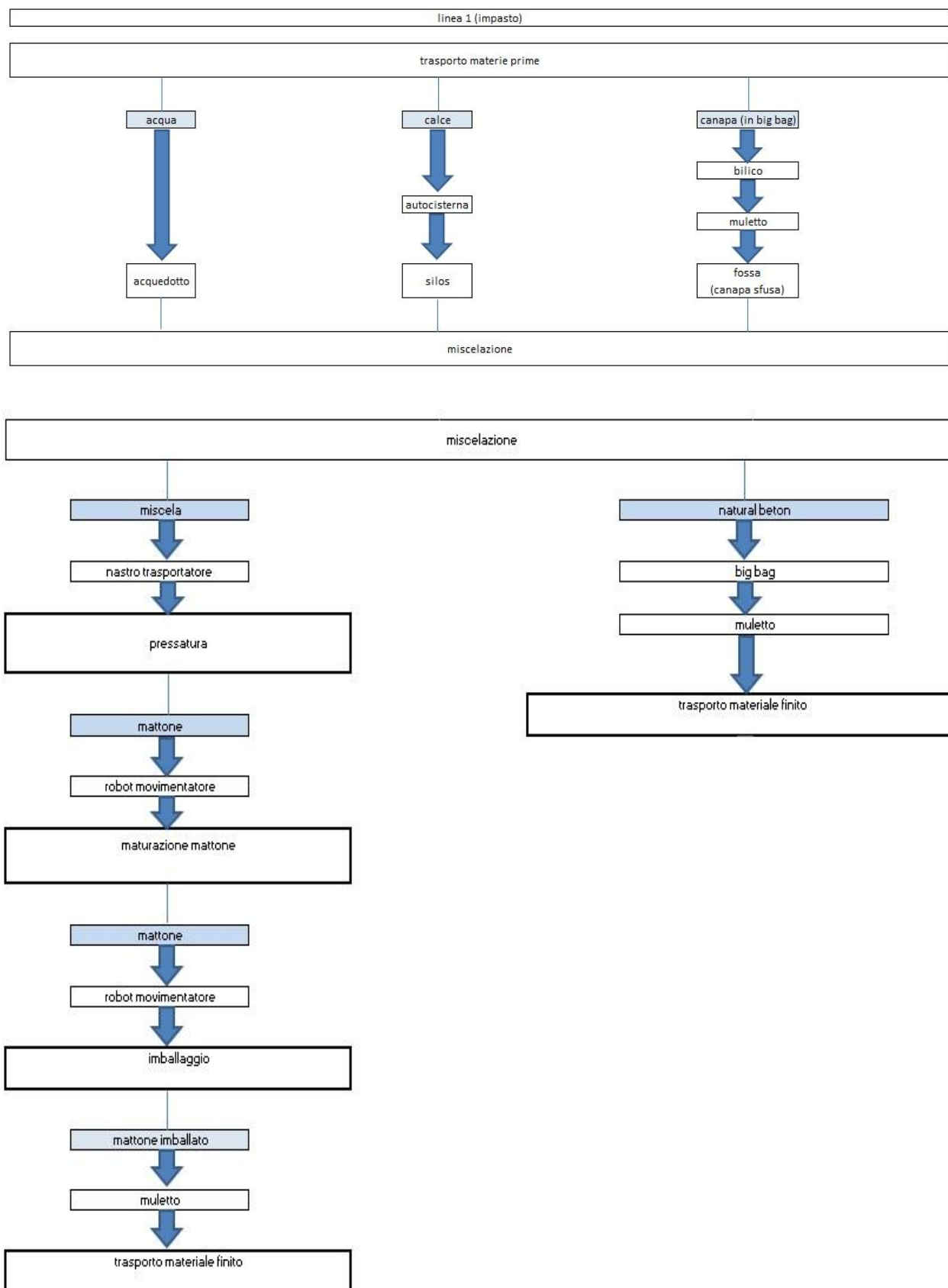



FIG-2 SCHEMA A BLOCCHI DELLE MISCELE

Passiamo ora a descrivere la fase di miscelazione per un ciclo di formazione della miscela in calce e canapa. Una volta che calce e canapa sono stati inseriti all'interno della miscelatrice, la miscelatrice stessa provvede all'aggiunta dell'acqua ottenendo l'impasto di calce e canapa.

Come detto in precedenza i valori massici, in kg, dei tre ingredienti sono riferiti ad un ciclo di miscela, ovvero alla formazione di 0,6 mc di biomattone i valori di input da inserire nel Simapro sono:

- acqua: 145 litri
- calce: 120 kg
- canapulo: 60 kg

Per quanto riguarda il N.B. 1:1 i valori di input da inserire, per ciclo di lavorazione, nel Simapro sono:

- acqua: 80 litri
- calce: 60 kg
- canapulo: 60 kg

Infine per il N.B. 2:1 i valori di input da inserire, per ciclo di lavorazione, nel Simapro sono:

- acqua: 110 litri
- calce: 120 kg
- canapulo: 60 kg

Da Database Ecoinvent del software sono state selezionate, per i tre ingredienti della miscela le seguenti voci:

- per l'acqua: Tap water, at user/RER U;
- per la calce: Lime mortar, at plant/CH U;
- per il canapulo: Lavorazione Canapa - Canapulo1_economico + CO_2 bio;

Il processo selezionato per il canapulo è relativo al lavoro di tesi di Valeria Vernelli "Analisi LCA della coltivazione della canapa e suoi possibili utilizzi nel campo della bioedilizia".
Per le tre miscele alla fase di miscelazione è associato un consumo di energia elettrica implementato in kWh. Di seguito sono elencati i consumi elettrici dei tre composti per l'utilizzo della miscelatrice e per unità di ciclo:

Biomattone: 0,776 kWh;
N.B. 1a2 : 0,776 kWh;
N.B. 1a1 : 0,776 kWh.

Come è possibile notare i consumi elettrici della miscelatrice sono identici in quanto la fase di miscelazione dura circa 240 sec per tutte le tipologie di miscele. Il valore numerico del consumo elettrico è stato calcolato misurando l'amperaggio orario della macchina. Per passare da Ampere a Watt abbiamo utilizzato questa formula:

$V * A * \cos \varphi * 3^{0,5}$

dove V= 400 Volt;

A è il valore di amperaggio orario = 24 A/h;

il cos φ=0,7;

$3^{0,5}$= 1,732050808.

$V * A * \cos \varphi * 3^{0,5}$ = 11639,3814 W/h che in kW/h sono 11,63938143

(11639,3814/1000 per il passaggio da W/h a kW/h)

Passati ad ottenere un valore orario di potenza abbiamo rapportato tutto al tempo di miscelazione ovvero 240 sec:

$$11,63938143 \text{ kW/h}*(240\text{sec}/3600\text{sec/h})= 0,776 \text{ kW}$$

Moltiplicando il consumo per un ora si ottiene: 0,776 *1h= 0,776 kWh.

Chiaramente il tutto è riferito allo svolgimento di un ciclo di produzione.

Il processo selezionato dal Database Ecoinvent per i consumi elettrici impiegati nella nostra tesi è: Electricity, medium voltage, at grid/IT U.

A questo consumo elettrico si deve sommare quello delle attrezzature ausiliarie, che comprendono utilizzo delle ventole, luci, etc. Il consumo in termini di energia elettrica assorbita, durante il ciclo di miscelazione è: 0,08 kWh (la formulazione matematica ed il procedimento analitico è identico a quello descritto in precedenza) dove il valore di amperaggio orario è: 2,5 A/h. Questo consumo elettrico rientra nei valori di input per il processo di miscelazione solo per il N.B. 1:1 e 2:1, in quanto la miscela destinata alla formazione del biomattone passa attraverso altre unità di processo, come vedremo in seguito, e perciò i consumi elettrici degli ausiliari per la fase di miscelazione sono da sommare agli altri consumi elettrici integrati all'intero processo.

Completata la fase di miscelazione il composto, per il N.B. 1:1 e 1:2 (come è ben evidenziato nello schema a blocchi precedentemente mostrato), è pronto per essere inserito nei Big Bag da 2mc. La miscela presenta un'elevata quantità d'acqua, che rende il materiale piuttosto inconsistente ed umido e quindi non adatto a molte applicazioni edilizie, perciò necessita di un periodo di

maturazione, all’aria aperta, senza nessun uso di macchine, di circa 60 giorni; chiaramente ad esso è associato un impatto nullo. Dopo aver inserito i valori in massa dei tre ingredienti, si procede a selezionare il tipo di energia elettrica utilizzata ed a inserire i valori di consumo elettrico, in kWh.

5.5.5 Fasi di processo per il Biomattone

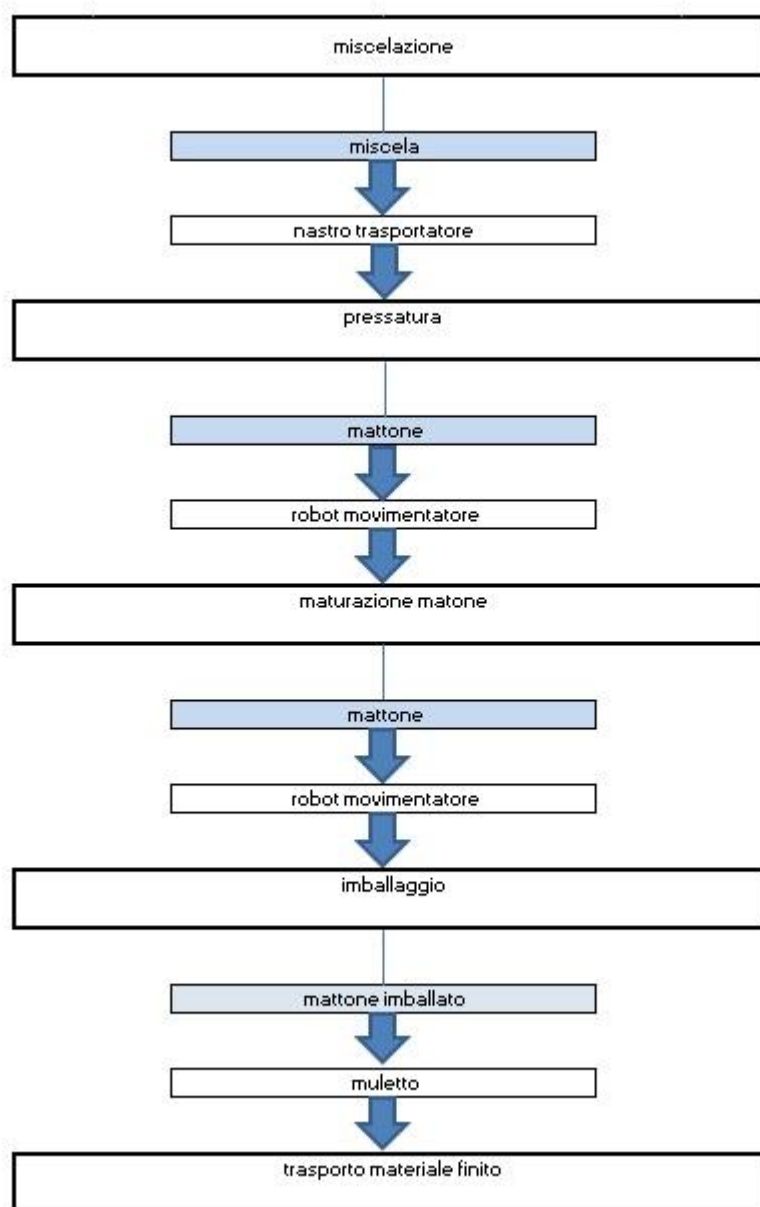



FIG-3 SCHEMA A BLOCCHI DEL BIOMATTONE

Come è mostrato in figura 3 il materiale in uscita alla miscelazione viene dapprima pressato e successivamente un robot movimentatore lo invia in una sruttura per la maturazione.

5.5.5.1 Pressatura

Esaurito il processo di miscelazione il biocomposito, che diventerà biomattone, viene inviato attraverso un nastro trasportatore alla successiva unità di processo: la pressatura.
Un ciclo di pressatura utilizza circa 0,1 mc di materiale biocomposito, quindi ogni ciclo di miscelazione (0,6 mc) alimenta 6 cicli di pressatura. Il consumo elettrico della pressa in questa fase, per ogni ciclo di pressatura è: 0,306 kWh. Questo valore è ottenuto sempre dalla formula analitica precedente a cui è associato però un amperaggio di 65 A/h e infine rapportato tutto per la durata di un ciclo di pressatura, ovvero per 35 sec.

5.5.5.2 Robot movimentatore

Completata questa seconda fase, il biomattone in uscita dalla pressa viene trasportato e indirizzato verso un robot che carica i biomattoni su alcuni ripiani (fig. 4) per poi disporli nella definitiva collocazione per la maturazione (fig. 5). Lo scopo di questa operazione appunto è quella di lasciar maturare i biomattoni, per ottenere la giusta consistenza del materiale. I mattoni in questa fase di maturazione attraverso l'ausilio di aria naturale, non ventilata e forzata, perdono circa metà del loro peso. Da notare infine che gli scarti di materiale biocomposito sviluppati durante il ciclo di pressatura vengono reintegrati come materiale input in fase di miscelazione, non provocando perciò impatti ambientali in fase di smaltimento: il valore comunque in massa da inserire in miscelazione è davvero poco rilevante.

FIG-4 FOTO DEI RIPIANI PER I BIOMATTONI

FIG-5 DESTINAZIONE FINALE DEI BIOMATTONI PER LA MATURAZIONE

I consumi energetici del robot si aggirano intorno a 0,290 kWh, per ciclo da 2 mc di biomattone, ovvero il robot viene azionato ogni 20 cicli della pressa consumando circa 0,290 kWh. Anche in questo caso il valore del consumo energetico è stato calcolato con la formula precedente partendo da un consumo di 9 A/h e rapportando il tutto alla durata del processo che è di 240 sec, come visto in precedenza. Infine anche per l'intero ciclo del processo di formazione del biomattone bisogna inserire il valore del consumo elettrico degli ausiliari che sono in funzione non solo durante la fase di miscelazione, come per il N.B. 1:1 e 2:1, ma anche durante l'utilizzo della pressa e del robot. Il consumo elettrico associato a tutto il ciclo di produzione del biomattone è: 0,969 kWh. In questo caso il valore energetico, calcolato come in precedenza, è riferito a tutta la durata del ciclo di produzione del biomattone che è di circa 15 min. Nel Simapro perciò in primo luogo, dopo la fase di miscelazione, abbiamo creato, per il biomattone, altre due processi: la pressatura e l'utilizzo del robot, in secondo luogo sono stati inseriti i consumi energetici e infine, selezionate le voci dei materiali utilizzati sono state inserite le quantità di materiale biocomposito in ingresso ed in uscita da queste due unità di processo. Di seguito un confronto tra biomattone appena uscito dalla fase di pressatura (a destra) e biomattone maturo (a sinistra) (fig.6).

FIG- 6 CONFRONTO TRA DUE BIOMATTONI

5.6. Scenari in uscita per entrambi i prodotti

5.6.1 Imballaggio biomattone

Mentre per il N.B. 1:1 e 2:1 non sono previsti impatti per la fase di imballaggio, in quanto il prodotto è inserito in contenitori in tessuto da 2 mc a rendere, il biomattone necessita di un imballaggio. In primo luogo il biocomposito viene caricato manualmente su dei pallet (fig.7).

FIG- 7 FOTO DEI BIOMATTONI CARICATI SU PALLET

Successivamente viene avvolto con un film sottile trasparente e fissato con una reggetta. La fase di imballaggio è tutta manuale quindi non abbiamo inserito nessun valore di consumo elettrico. L'utilizzo del film e della reggetta ha però i suoi impatti. Abbiamo calcolato attraverso il Simapro l'impatto complessivo per l'imballaggio per 600 kg di biomattone che corrispondono circa a 2 pallet (anch'esso materiale a rendere perciò non impattante) a cui è associato un consumo di 0,6 kg di film in LDPE (Packaging film, LDPE, at plant/RER U da database Ecoinvent), e 0,4 kg di reggetta (IMBALLAGGIO REGGETTA da database).

5.6.2 Scenario in uscita dal cantiere per 2 mc di biomattone e N.B. 1:1 e 2:1

Per caricare 2 mc di biomattone e di N.B.(1:1 e 2:1) sul bilico è previsto l'utilizzo del muletto che consuma rispettivamente:

- 0,2 kg di diesel (in circa 3 min),
- 0,1 kg di diesel per la miscela (1:1 e 2:1).

Il processo selezionato da Database Ecoinvent è: Diesel, at regional storage/CH U

Si è ipotizzato infine lo scenario in uscita dal cantiere di un bilico a seconda del tipo di materiale trasportato:

- 8 ton di biomattone (corrispondenti a circa 26,6 m^3 di biocomposito)
- 12 ton di miscela per il N.B.1:1 (corrispondenti a circa 48 m^3 di miscela)
- 14,4 ton di miscela per il N.B.2:1 (corrispondenti a circa 48 m^3 di miscela)

il valore differente di peso tra le due miscele è dovuto alla differenza dei pesi specifici.

Sono stati presi in considerazione 3 scenari di trasporto in uscita considerando la distanza tra sito produttivo e destinazione finale rispettivamente a 100, 200 e 500 km.

Nel Simapro sono stati inseriti:

- il tipo di mezzo di trasporto utilizzato, Transport, lorry 7.5-16t, EURO4/RER U da database Ecoinvent per tutti e tre i prodotti;
- la quantità fisica in uscita in (ton*km), per tutti i materiali e per i km nei differenti scenari.

5.7 Valutazione degli impatti

La fase di valutazione degli impatti è stata fatta per quantificare le emissioni, riferite ad 1 kg della miscela di calce canapa (N.B.1:1 e 2:1) e del biomattone, per l'intero ciclo produttivo. Come detto in precedenza, nella redazione dell'analisi di inventario, sono stati valutati anche gli impatti associati alla fase di trasporto degli ingredienti della miscela (calce e canapulo), considerando anche uno scenario alternativo per il trasporto della calce. Gli indicatori utilizzati nell'analisi, già descritti nel capitolo 2, sono :

· Greenhouse Gas Protocol;
· Cumulative Energy Demand;
· Ecoindicator 99;
· Ecological Footprint.

Per ragioni di semplicità vengono analizzati dapprima gli impatti riferiti ad1 kg di prodotto della miscela di calce e canapa (N.B.1:1 e 2:1). Le fasi di processo prese in considerazione tengono conto degli scenari di trasporto in entrata dei materiali e della fase di formazione del prodotto.

5.7.1 Trasporti in ingresso e unità di processo del N.B. 1:1 e 2:1

5.7.1.1 Greenhouse Gas Protocol

Il Greenhouse Gas Protocol permette di quantificare, per l'effetto serra, gli impatti dovuti a tutte le unità di processo dei due prodotti.
In questa prima analisi vengono valutati gli impatti associati alla fase di trasporto e alla fase di lavorazione degli ingredienti (calce e canapulo) della miscela, e ai consumi elettrici della fase di miscelazione. Inoltre viene valutato anche uno scenario alternativo per il trasporto della calce.
Di seguito è riportata la tabella 1 che indica i valori di kg di CO_2-eq divisi per i quattro componenti di anidride carbonica:

- carbonio proveniente da combustibili fossili (Fossil CO_2);
- carbonio proveniente da fonti biogeniche come piante e alberi (Biogenic CO_2 eq);

- carbonio proveniente da trasformazioni del territorio, ovvero gli impatti diretti (CO_2 eq from land transformation);
- assorbimento di carbonio dalle piante ed dagli alberi in fase di crescita (CO_2 uptake).

Categoria d'impatto	Unità	N.B. 1:1	N.B. 1:1 alternativo	N.B. 2:1	N.B. 2:1 alternativo
Totale	kg	-0,30	-0,32	-0,04	-0,09
Fossil CO2 eq	kg	0,25	0,23	0,34	0,28
Biogenic CO2 eq	kg	0,01	0,01	0,01	0,01
CO2 eq from land transformation	kg	0,00	0,00	0,00	0,00
CO2 uptake	kg	-0,56	-0,56	-0,39	-0,39

TABELLA-1 KG DI CO_2-EQ DIVISI PER I QUATTRO COMPONENTI DI ANIDRIDE CARBONICA

Da questa tabella si evince, in primo luogo, che entrambe le miscele hanno un valore di CO_2-eq totale negativo: questo è dovuto all'alto valore di anidride carbonica assorbita in fase di crescita della canapa. In secondo luogo la tabella ci indica una notevole differenza tra i kg di CO_2 totali. Questa discrepanza dipende dalla quantità di calce impiegata. Infatti la miscela del N.B.1:1, a parità di peso, contiene una dose inferiore di calce che genera un contributo di CO_2 uptake rilevante e un impatto di CO_2 fossile più piccolo; bisogna però tenere presente che i due tipi di N.B. hanno impieghi differenti, quindi il loro uso va scelto in base all'utilizzo finale richiesto. Infine si evidenzia che cambiando gli scenari di trasporto della calce, passando cioè da una distanza di 530 km a 40 km, gli impatti di CO_2 fossile chiaramente si riducono e di conseguenza anche i kg di CO_2 totale. Questo è molto importante in quanto la fase di trasporto della calce e gli impatti associati ad essa hanno un peso molto rilevante. L'azienda Equlibrium potrebbe migliorare il processo produttivo della miscela proprio prendendo spunto da questa ultima analisi riguardante il trasporto alternativo della calce.

La figura 8 rappresenta graficamente ciò che è mostrato in tabella.

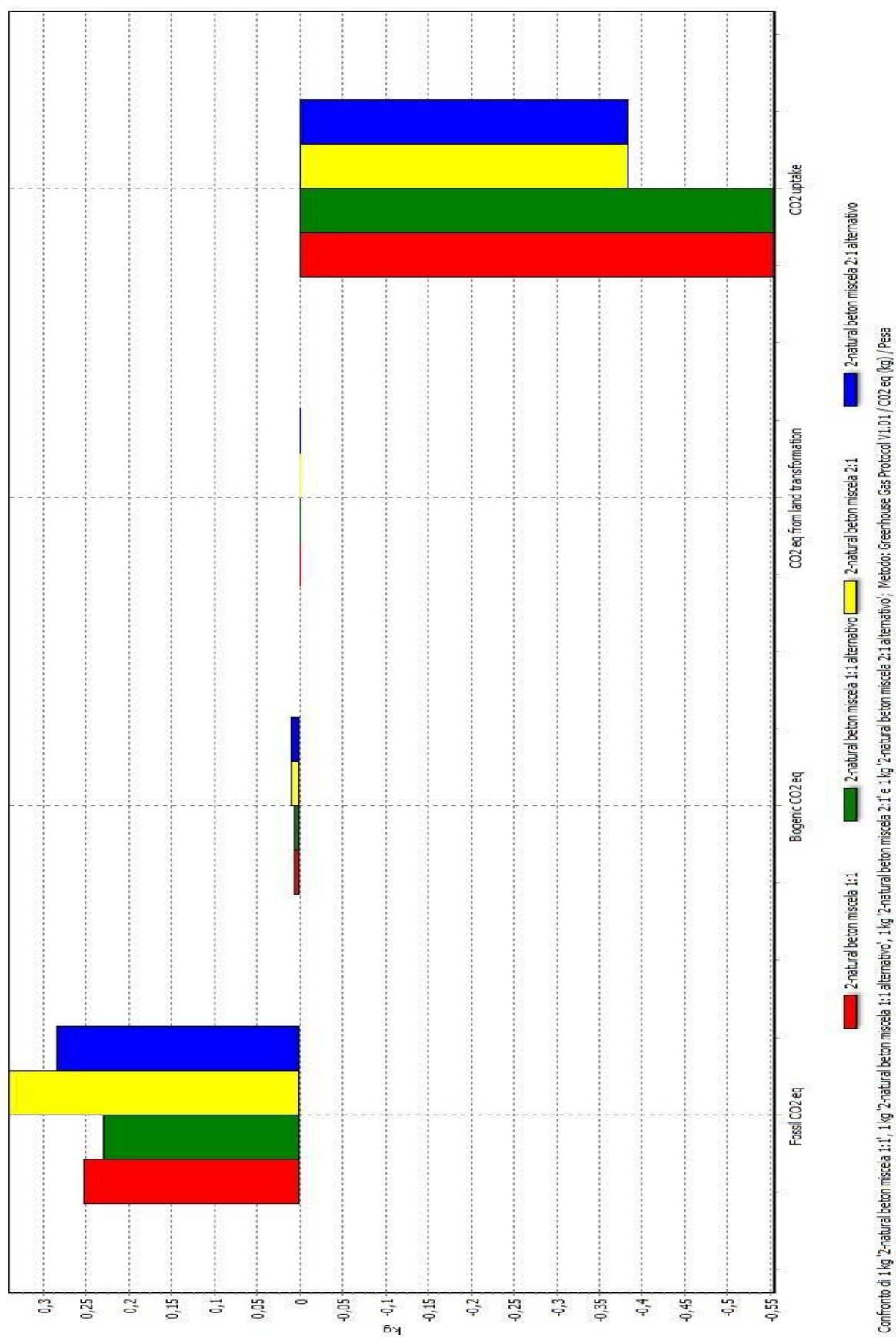



FIG-8 KG DI CO_2-EQ DIVISI PER I QUATTRO COMPONENTI DI ANIDRIDE CARBONICA

5.7.1.2 Ecoindicator 99 (H)

Passando ad analizzare gli impatti con Econdicator 99 sono stati presi in considerazione le seguenti fasi del processo:

- la lavorazione del canapulo;
- il processo di produzione della calce;
- il consumo dell'energia elettrica per la miscelazione del N.B;
- i trasporti in entrata dei materiali.

Inizialmente si fa riferimento al valore aggregato, ovvero quanto ciascuna fase presente nel processo di formazione della miscela sia influente sul punteggio totale (fig. 9); poi si sono valutati i valori disaggregati, quindi quali categorie d'impatto sono più rilevanti.

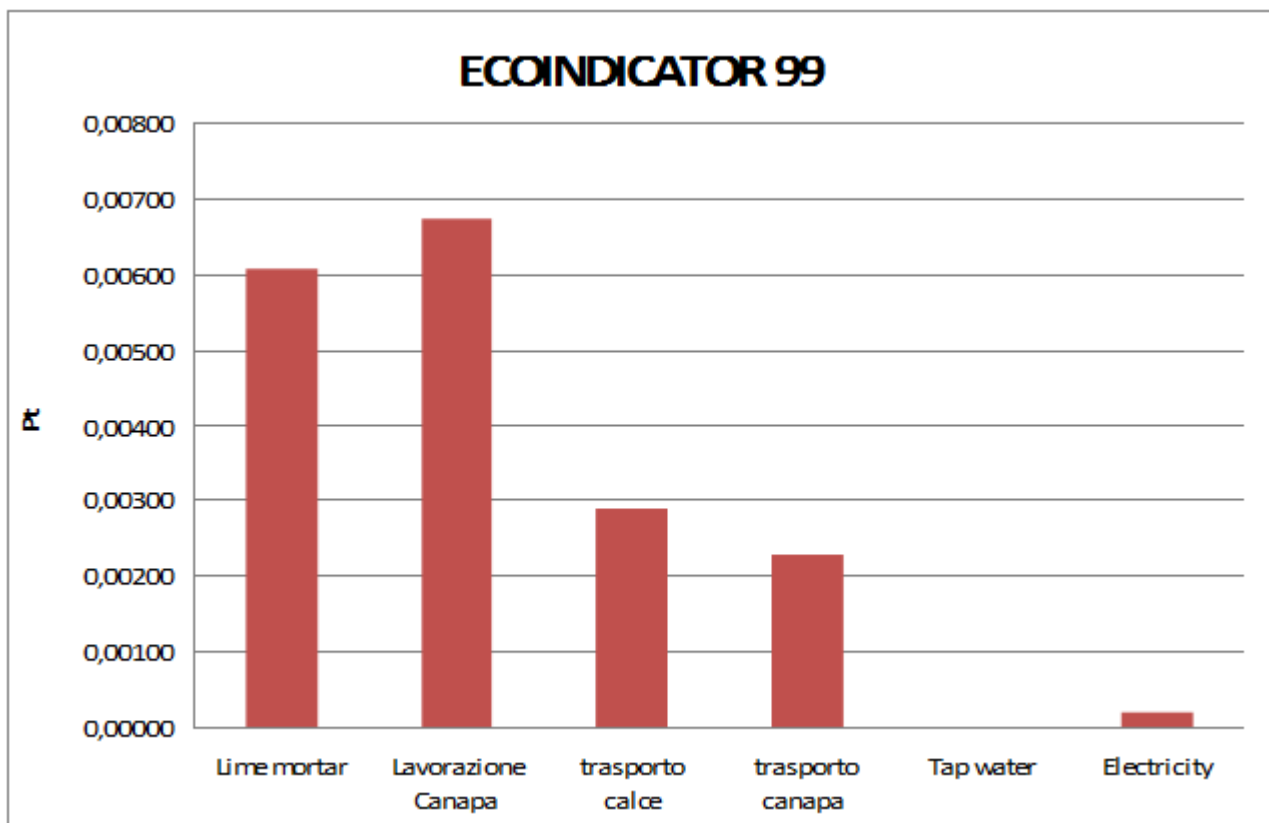



FIG-9 PUNTEGGIO ECOINDICATOR 99 AGGREGATO PER LE FASI DI PROCESSO PER IL N.B.1:1

Dal primo grafico si nota, per la produzione di 1 kg di Natural Beton 1:1, come la lavorazione della canapa e la produzione della calce abbiano un peso maggiore rispetto alle altre unità di processo. Successivamente, come detto in precedenza, si è voluto evidenziare il peso di ciascun categoria d'impatto sul punteggio totale disaggregato.

Come si evince dalla figura 10 è risultato molto importante il contributo dei combustibili fossili. Rilevanti sono anche i contributi degli inquinanti inorganici, di cambiamenti climatici e dell'uso del suolo.

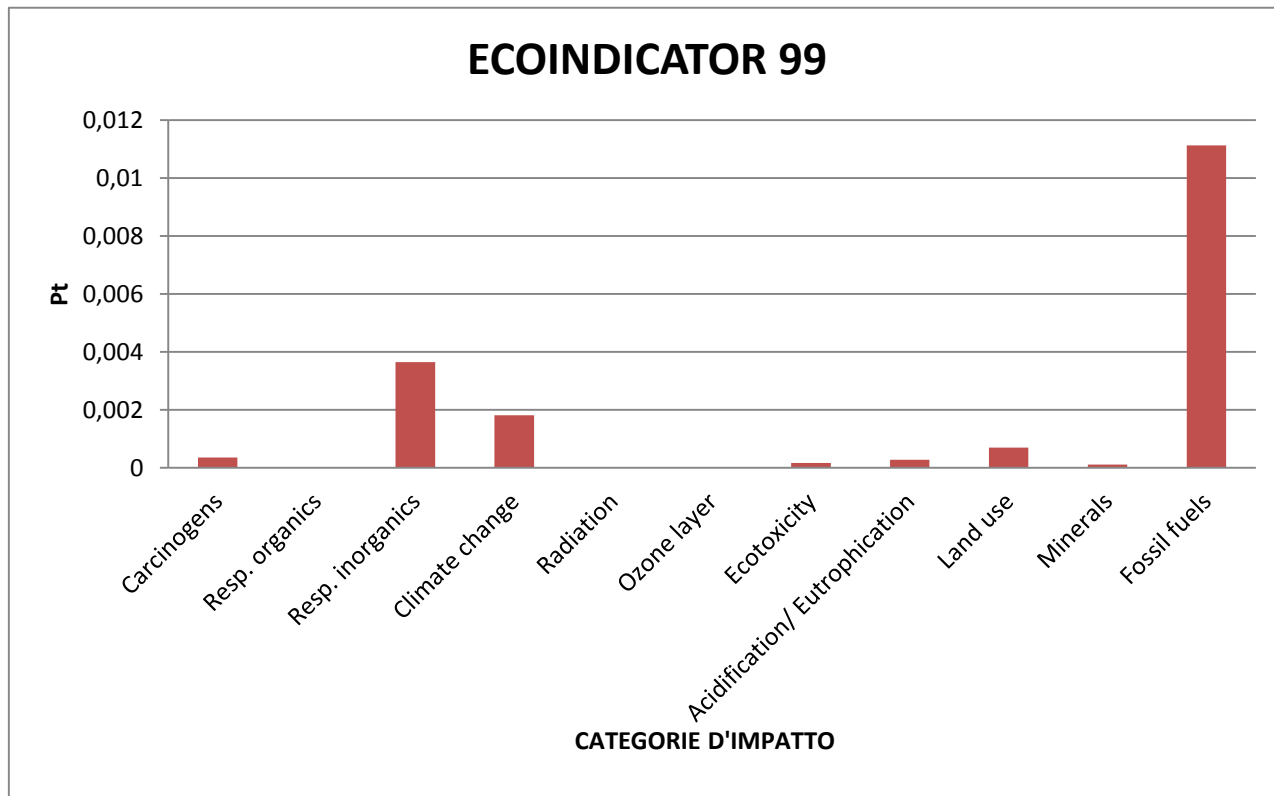



FIG-10 PUNTEGGIO ECOINDICATOR 99 DISAGGREGATO PER LE CATEGORIE D'IMPATTO PER IL N.B.1:1

Di seguito sono riportati grafici analoghi a quelli precedenti, riferiti però alla produzione di 1kg di N.B. 2:1.

Dal grafico di figura 11 si nota subito che tutto il processo è legato alla produzione e al trasporto della calce. Questo dipende dal fatto, come detto in precedenza, che in un 1 kg di miscela 2:1 è presente il doppio della calce rispetto alla miscela 1:1. Di conseguenza l'impatto relativo al trasporto e alla lavorazione della canapa diminuisce.

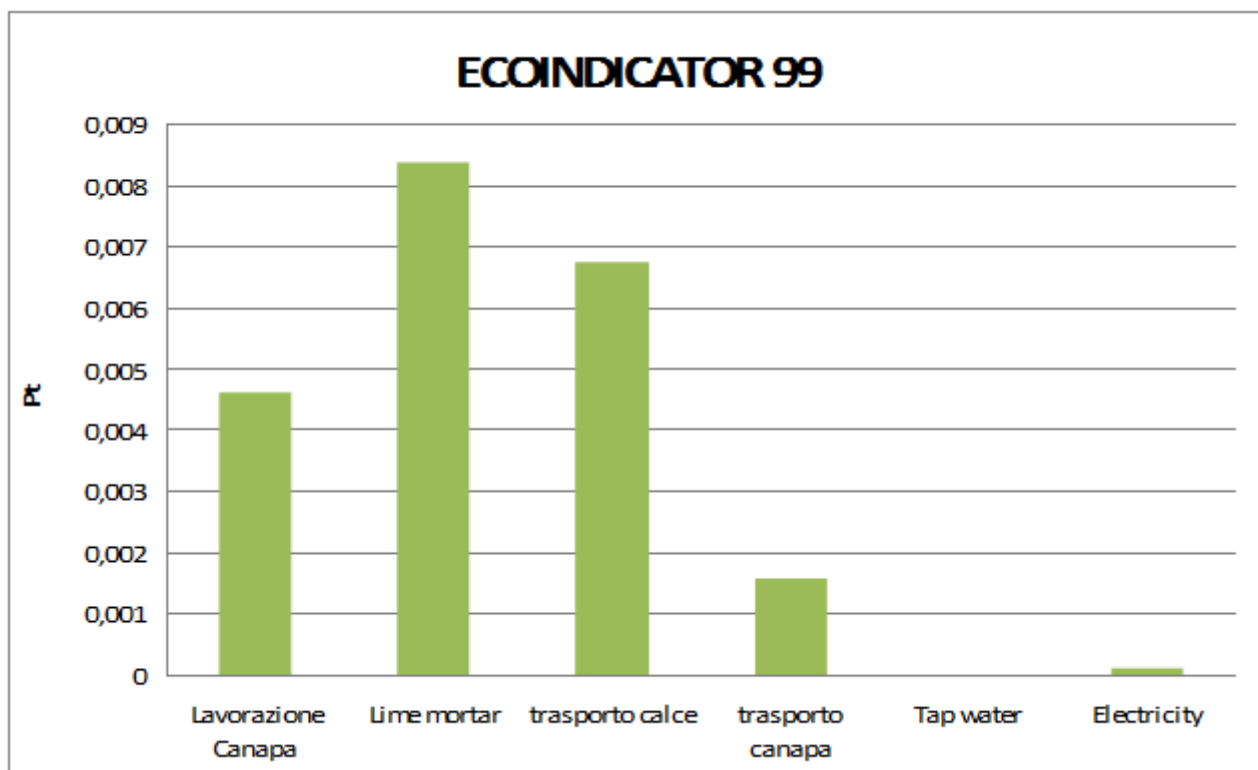



FIG-11 PUNTEGGIO ECOINDICATOR 99 AGGREGATO PER LE FASI DI PROCESSO PER IL N.B. 2:1

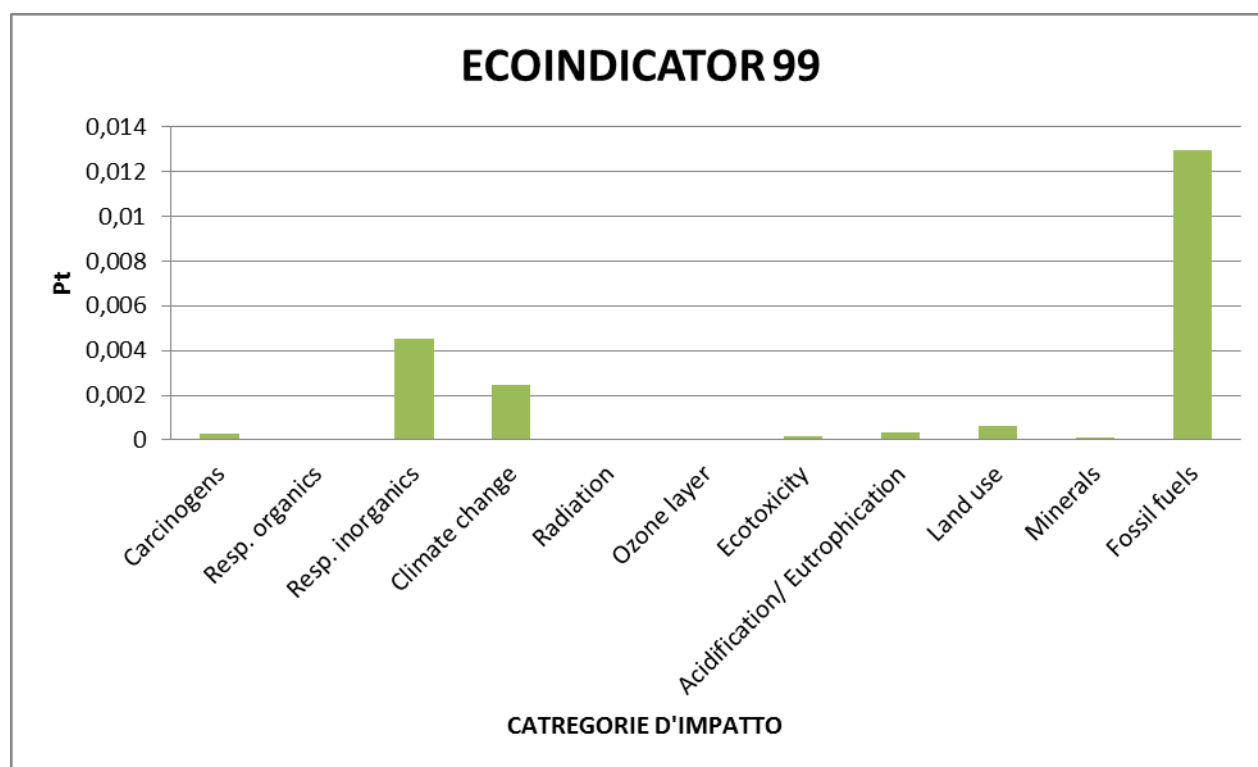



FIG-12 PUNTEGGIO ECOINDICATOR 99 DISAGGREGATO PER LE CATEGORIE D'IMPATTO PER IL N.B. 2:1

Anche in questo caso (fig.12) al consumo di combustibili fossili, anche maggiore rispetto alla miscela 1:1, è associato l'impatto ambientale più notevole, seguito dall'inquinanti inorganici, dal cambiamento climatico e infine dall'uso del suolo.

5.7.2 Unità di processo per il biomattone

5.7.2.1 Greenhouse Gas Protocol

Analizzando gli impatti associati, in figura 13, alla fase di produzione di 1 kg biomattone, per l'indicatore dell'effetto serra, e comparando gli stessi con i kg di CO_2-eq riguardanti la miscela 1:1 è possibile notare che i contributi associati alla CO_2 fossile sono maggiori, proprio come ci si aspettava, e questo dipende dal fatto che il biomattone, subendo due unità di processo in più della miscela, ha un consumo di energia elettrico superiore e in aggiunta contiene una quantità di calce maggiore. Inoltre dato il minor quantitativo di canapulo, a parità di peso, il contributo della CO_2 uptake è meno rilevante nel biomattone e molto simile a quella associata nella miscela 2a1.
Questo grafico in pratica sintetizza che la miscela N.B.1:1, per l'effetto serra, ha impatti minori rispetto al biomattone, anche se quest'ultimo in fase applicativa (per i muri di tamponamento, per esempio) viene utilizzato senza supporti di altri materiali, invece il N.B.1:1 solitamente è integrato con un pannello in magnesite (vedi cap.4) e quindi andrebbe confrontato l'impatto dell'intero pacchetto stratigrafico e non solo dei materiali.

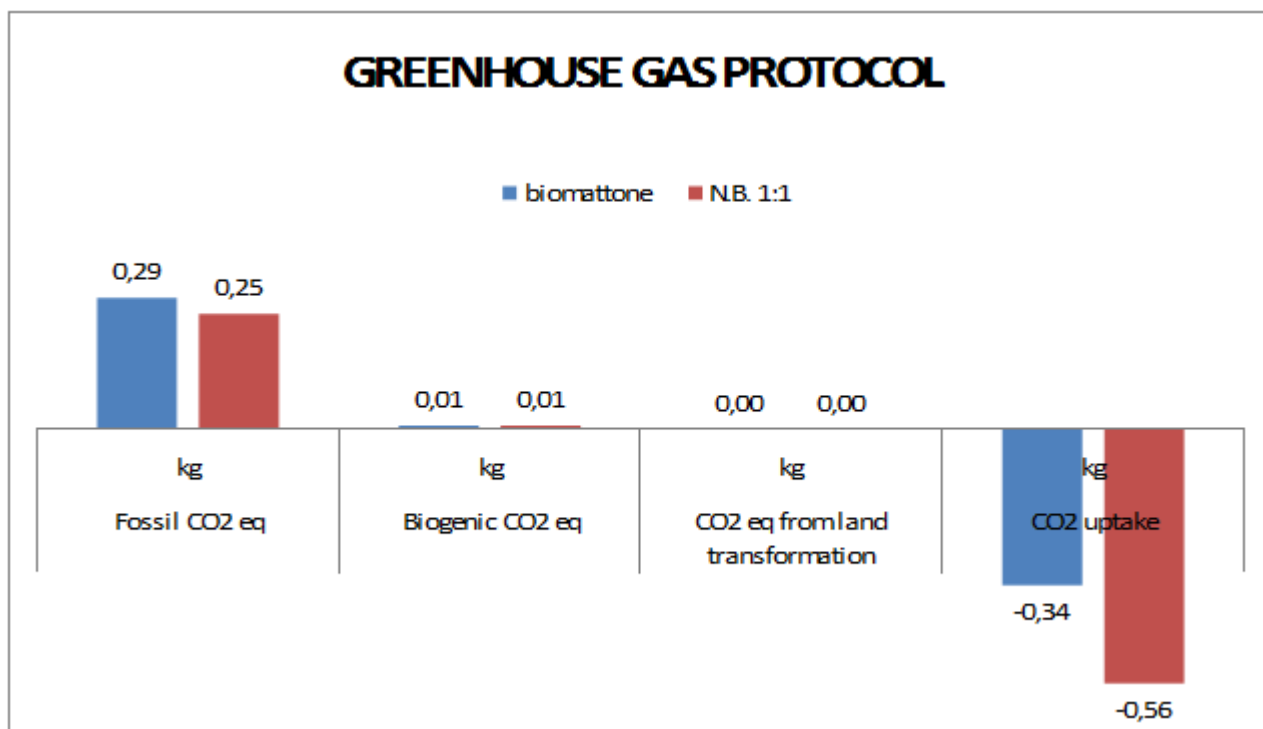



FIG-13 KG DI CO_2-EQ PER IL BIOMATTONE E N.B.1:1

5.7.2.2 Ecoindicator 99 (H)

Nel grafico sottostante (fig.14) sono evidenziati i pesi di ciascun categoria d'impatto sul punteggio totale disaggregato per l'intero di processo di formazione di 1 kg di biomattone.
Come per il N.B. è risultato molto importante il contributo dei combustibili fossili, e poi a seguire quelli legati all'inquinamento di sostanze inorganiche e per il cambiamento climatico.

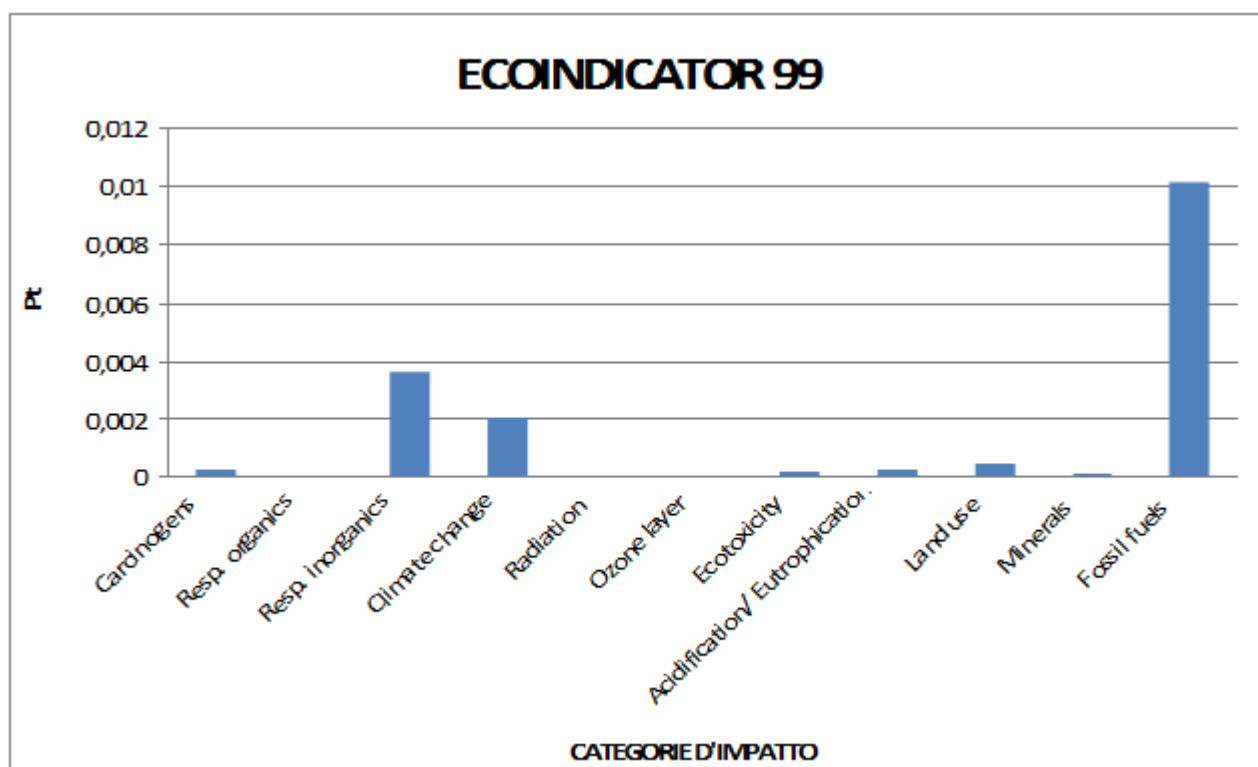



FIG-14 PUNTEGGIO ECOINDICATOR 99 DISAGGREGATO PER LE CATEGORIE D'IMPATTO

Di seguito, in figura 15, sono graficamente mostrati i valori del punteggio aggregato, per evidenziare le fasi di processo più impattanti. Dal grafico si deduce che la fase di trasporto e di produzione della calce e della canapa sono quelle più impattanti, nonostante un consumo di elettricità superiore per la fase di pressatura e movimentazione del robot.

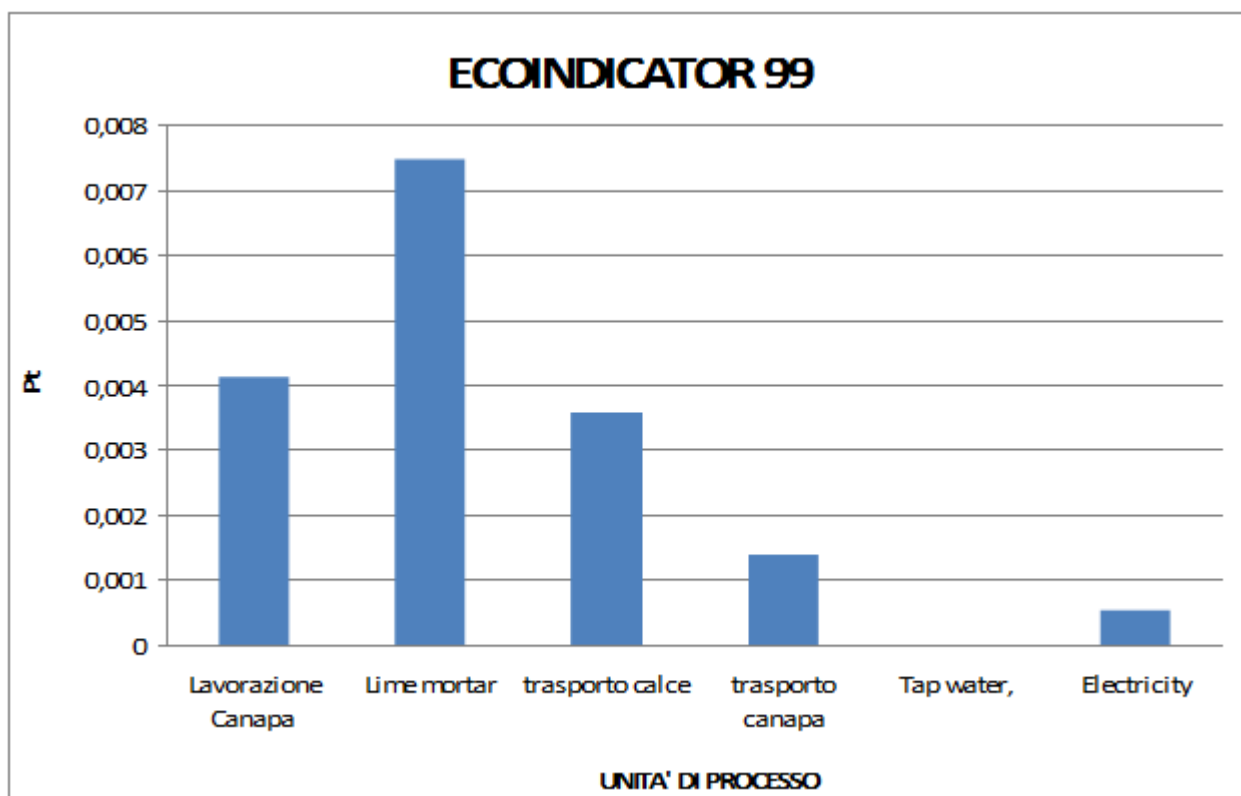



FIG-15 PUNTEGGIO ECOINDICATOR 99 AGGREGATO PER FASI DI PROCESSO

5.7.3 Ecological Footprint (EF)

L'impronta ecologica è definita come la misura della superficie biologicamente produttiva di mare e di terra richiesta per produrre le risorse consumate e per assorbire parte dei rifiuti generati dal consumo di combustibili fossili di una popolazione.
L'ecological footprint è un indicatore che permette di valutare la sostenibilità del processo. E' definita come la somma integrata nel tempo di ogni occupazione del suolo, diretta ed indiretta, e della superficie necessaria all'assorbimento delle emissioni legate ai combustibili fossili ed al cemento utilizzati dal processo di produzione.

Per determinare l'impronta ecologica si considerano i seguenti aspetti:
1. Terra coltivata (per produrre grano, riso, frutta, verdura, cotone, ...)
2. Pascoli (allevamento bestiame per carne, latte, lana, ...)
3. Zone di mare (pesce)
4. Foreste (legno, carta, ...)

5. Aree edificate

6. Superficie vegetale necessaria ad assorbire le emissioni di CO_2 in modo rinnovabile i combustibili fossili utilizzati.

Di seguito è raffigurato un grafico (fig. 16) che mostra, in ordinata, il valore di EF in Pt (punteggio singolo) suddiviso per tre componenti: ovvero la CO_2, l'occupazione del suolo diretta (land occupation) e quella indiretta (nuclear). Il tutto riferito alla produzione di 1kg dei tre prodotti: biomattone, N.B. 1:1 e 2:1.

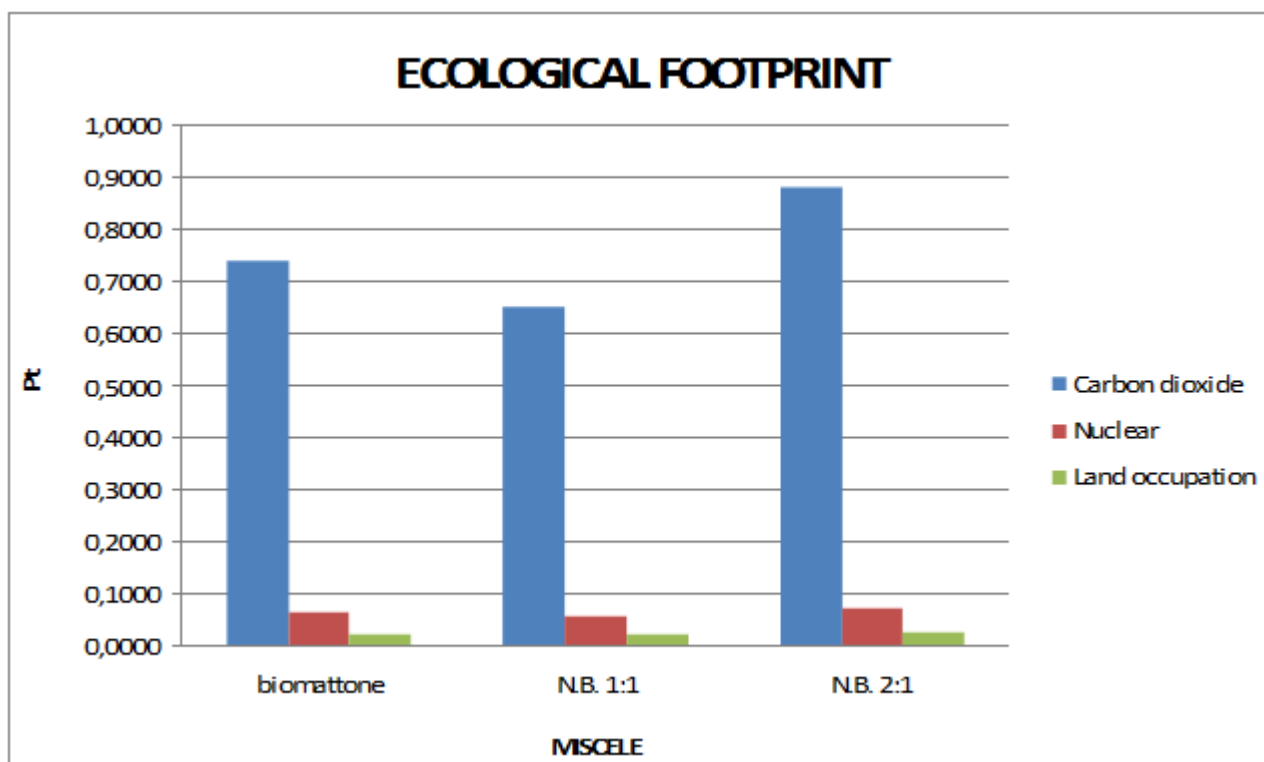



FIG-16 PUNTEGGI PER L'ECOLOGICAL FOOTPRINT DEI TRE PRODOTTI

Dal grafico è evidente come i maggiori contributi sono dovuti al consumo di combustibile fossile. Soprattutto il consumo di carburante per la fase di trasporto dei materiali ha un evidente peso, e il N.B.2:1, utilizzando in proporzione più calce, ha un impatto di CO_2 superiore, nel punteggio, del biomattone, nonostante un consumo di energia elettrica inferiore.

5.7.4 Cumulative Energy Demand

Ricordiamo che questo indicatore è un metodo che permette di valutare i consumi energetici, in MJ, di un processo produttivo focalizzandosi sull'analisi dell'impiego delle risorse energetiche così suddivise:

- energia non rinnovabile, fossile;
- energia non rinnovabile, nucleare;
- energia rinnovabile, biomasse;
- energia rinnovabile, eolica, geotermica e solare;
- energia rinnovabile, idroelettrica.

Viene calcolata così sia l'energia diretta, ovvero quella impegnata in processo produttivo, sia quella indiretta cioè la quota parte di energia stoccata nel prodotto e pronta per essere consumata.
Qui sotto in figura 17 è mostrato un grafico che riassume i contributi, rinnovabili e non, dell'energia legata al processo di produzione di 1 kg di biomattone, N.B. 1:1 e 2:1.

	Non renewable, fossil	Non-renewable, nuclear	Non-renewable, biomass	Renewable , biomass	Renewable , wind, solar, geothe	Renewable , water
biomattone	2,2321	0,3253	0,0001	3,3871	0,0020	0,0879
N.B. 1:1	2,3776	0,2902	0,0001	5,4608	0,0019	0,0744
N.B. 2:1	2,8047	0,3769	0,0001	3,7960	0,0022	0,0968

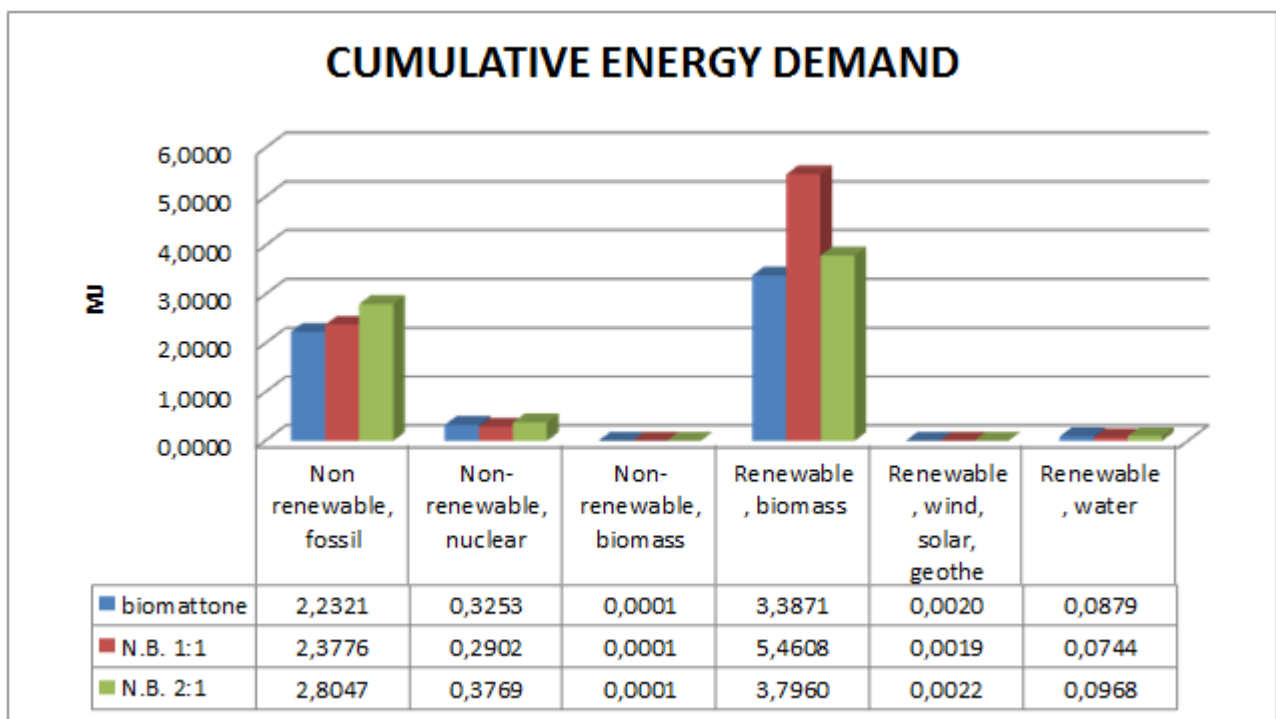



FIG-17 MJ DEI TRE PRODOTTI, PER LE SEI COMPONENTI ENERGETICHE

Dal grafico è possibile notare come i contributi di energia fossile non sono simili, per i tre prodotti, data la differenza dei consumi elettrici e il diverso apporto della fase di trasporto e produzione degli ingredienti della miscela. Questo è dimostrato dal fatto che nel N.B 1:1 essendo presente più canapulo il valore di energia da biomassa è superiore della miscela 2a1 e del biomattone. Inoltre è da evidenziare che il quantitativo di calce, a parità di peso, contenuto in 1 kg di N.B. 2a1 rispetto al biomattone è leggermente superiore, per la quantità di acqua più piccola impiegata: questo comporta un impatto maggiore per l'energia fossile della miscela 2:1 soprattutto legata al trasporto della calce e della produzione della stessa.

CAP. 6 LCA DI ALCUNE STRATIGRAFIE

In questo capitolo vengono affrontati due studi differenti sull'analisi del ciclo di vita LCA di alcune stratigrafie per confrontare 1 m^2 di muratura di tamponamento perimetrale su nuova costruzione. Il primo studio propone di analizzare gli impatti di sei pacchetti stratigrafici divisi per due valori di trasmittanza differente, ovvero per U= 0,34 W/m^2*K e per U= 0,13 W/m^2*K. Le stratigrafie, riferite ad 1 m^2 di parete, sono composte da materiali differenti che comprendono da un lato l'utilizzo del biomattone, dall'altro l'impiego del mattone in laterizio affiancato ad un isolante naturale o un isolante sintetico. Questo tipo di analisi si prefigge lo scopo di confrontare, a parità di trasmittanza, queste tipologie di muri e di valutare, attraverso alcuni indicatori, il vantaggio dell'impiego del biomattone nel settore dell'edilizia. Il secondo studio invece riguarda un'analisi del ciclo di vita LCA della fase di consumo delle stratigrafie precedentemente descritte. Sono state considerate quattro zone climatiche; per ognuna di esse sono stati calcolati i valori di energia primaria per il riscaldamento associato a quel tipo di dispersione attraverso una funzione che lega i gradi giorno alle trasmittanze delle pareti. Lo scopo di questo secondo studio è quello di confrontare gli impatti, delle diverse tipologie di stratigrafie, considerando non solo l'involucro edilizio, ma anche il consumo termico ad esse associate. Si tratta in pratica di analizzare i benefici ambientali che si possono ottenere utilizzando trasmittanze differenti e di valutare in quanto tempo gli impatti vengano recuperati grazie all'isolamento termico introdotto.

6.1 Definizione degli scopi, unità funzionale e confini del sistema

L'obiettivo di questo studio LCA della parete è quello di sviluppare un'analisi comparativa degli impatti ambientali prodotti dalle alternative progettuali di un pacchetto stratigrafico, per muri di tamponamento, costruiti al fine di ottenere un determinato valore di trasmittanza. L'analisi degli impatti viene svolta a parità di trasmittanza, in quanto confrontare due muri di trasmittanza differente non ha senso in uno studio del genere, perché questo parametro influisce sulla quantità dei materiali utilizzati in fase di costruzione e quindi sui risultati finali dell'analisi.

L'unità funzionale, ovvero il termine di riferimento a cui associare consumi di risorse e impatti ambientali, considerata più consona per questo tipo di analisi LCA comparativa condotta sulle stratigrafie murarie è il metro quadro di parete. Questo tipo di studio non analizza i singoli processi di un sistema di produzione, ma cerca di dare una valutazione degli impatti associati all'impiego di differenti materiali edilizi, per l'ottenimento di prestabiliti valori di trasmittanza termica e quindi verificare qual'è la soluzione progettuale meno impattante. Il flusso di riferimento e i confini del sistema sono rispettivamente la quantità e la varietà di materiale utilizzato per rivestire e configurare con un certo spessore 1 m^2 di parete. Non vengono presi in considerazione eventuali consumi di acqua e di energia dovuti alla fase di costruzione, in quanto queste operazioni vengono fatte a mano e quindi non producono impatti. Questi contributi anche se ci fossero, sarebbero di scarso valore e comunque identico per tutte le configurazioni, e quindi possono essere non valutate in un'analisi comparativa come questa.

6.2 Qualità dei dati

Questo studio comparativo si basa soprattutto sull'utilizzo di dati secondari, quelli derivati da letteratura. Eccetto per le unità del biomattone, dell'intonaco di calce idraulica e sabbia e del canapulo, i dati dei mattoni in laterizio e degli isolanti naturali e sintetici fanno riferimento alla banca dati Ecoinvent.

6.3 Redazione dell'analisi di inventario

La scelta del tipo di materiale utilizzato nella costruzione dei sei pacchetti stratigrafici nasce dal voler comparare il biomattone, che da solo svolge sia la funzione autoportante che isolante, alle alternative più classiche che integrano all'impiego del mattone in laterizio un pannello di isolante, sintetico o naturale. Una volta deciso quali materiali utilizzare si è passato alla creazione di muri veri e propri.

Per calcolare gli spessori necessari all'ottenimento di un valore di trasmittanza prefissato abbiamo utilizzato il software PAN. Il PAN 2 è il software per il calcolo delle prestazioni termiche invernale ed estive e igrometriche delle strutture dell'involucro, sviluppato da Tep S.r.l. per ANIT, Associazione Nazionale per l'isolamento termico e acustico.

Permette di analizzare i seguenti parametri:

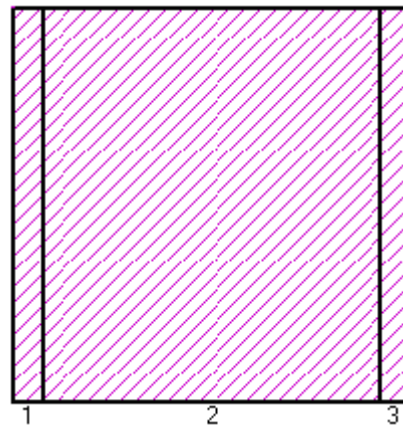
- Trasmittanza termica delle strutture opache e trasparenti (U) secondo norma EN ISO 6946;
- calcolo di attenuazione e sfasamento secondo UNI EN ISO 13786 e temperatura superficiale interna estiva secondo la norma EN ISO 13792;
- calcolo degli indici acustici secondo la legge di massa;
- verifica del rischio di condensazione superficiale e interstiziale secondo UNI EN ISO 13788.

Di seguito sono riportate le schede delle tre pareti di superficie unitaria ($1m^2$), in cui lo spessore dei materiali, e quindi di tutta struttura è calcolata per ottenere un valore di trasmittanza U= 0,34 W/m^2K.

Nei grafici la successione delle stratigrafie avviene da quella più interna verso quella più esterna.

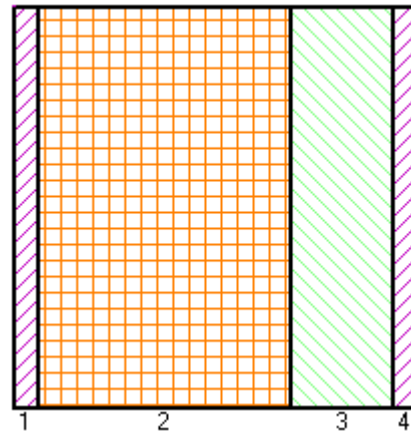
La prima stratigrafia descritta è quella che utilizza il biomattone:

1) Struttura A1: Muratura di tamponamento isolata con biomattone da 21,5 cm con U=0,34 W/m^2K

Dati generali	
Spessore:	0,251 m
Trasmittanza:	0,34 W/m²K

	Tipo di materiale	Materiale	Spessore [m]
		Superficie esterna	
1	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018
2	VAR	biomattone 250*200*500	0,215
3	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018

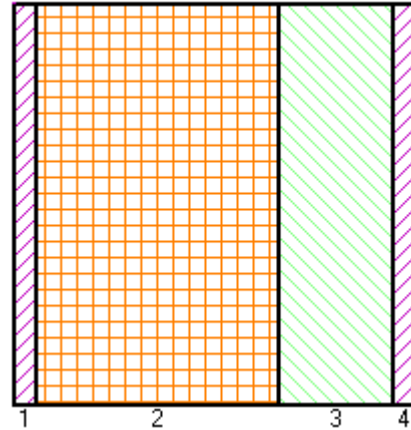
La seconda stratigrafia rappresentata è quella che integra l'uso di un mattone in laterizio forato ad un pannello isolante artificiale di polistirene espanso:

2) Struttura A2: Muratura di tamponamento con isolamento artificiale con U=0,34 W/m^{2}K

Dati generali	
Spessore:	0,316 m
Trasmittanza:	0,34 W/m²K

	Tipo di materiale	Materiale	Spessore [m]
		Superficie esterna	
1	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018
2	MUR	Laterizi forati sp.20 cm.rif.1.1.15	0,200
3	ISO	Polistirene espanso in lastre stampate per termocompressione	0,080
4	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018

La terza stratigrafia esposta è quella che integra l’uso di un mattone in laterizio forato ad un pannello isolante naturale in sughero:

3) Struttura A3: Muratura di tamponamento con isolamento naturale con U=0,34 W/m^{2}K

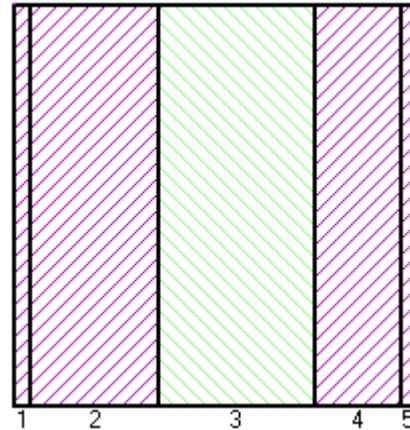
Dati generali	
Spessore:	0,330 m
Trasmittanza:	0,34 W/m²K

	Tipo di materiale	Materiale	Spessore [m]
		Superficie esterna	
1	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018
2	MUR	Laterizi forati sp.20 cm.rif.1.1.15	0,200
3	ISO	Sughero	0,094
4	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018

Bisogna evidenziare che tutte e tre le configurazioni impiegano lo stesso tipo di intonaco ovvero di calce idraulica e sabbia, e con lo stesso spessore in tutti i muri. Inoltre la tipologia di isolamento per i muri con isolante sintetico e naturale è a cappotto.

Qui sotto sono riportate le schede delle tre pareti di superficie unitaria (1m^2), in cui lo spessore dei materiali, e quindi di tutta struttura è calcolata per ottenere un valore di trasmittanza U= 0,13 W/m^2*K.

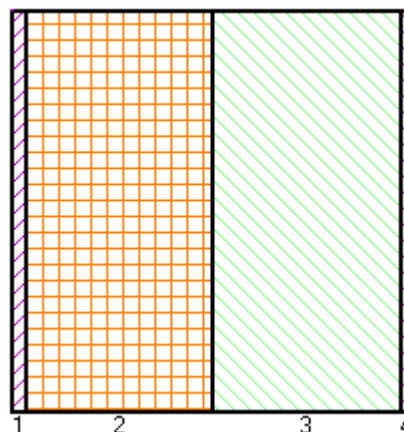
La prima stratigrafia descritta è quella che utilizza il biomattone e come isolante uno strato di canapulo :

3) Struttura B1: Muratura di tamponamento isolata con biomattone da 25 cm con U=0,13 W/m^2K

Dati generali	
Spessore:	0,466 m
Trasmittanza:	0,13 W/m^2K

	Tipo di materiale	Materiale	Spessore [m]
		Superficie esterna	
1	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018
2	VAR	biomattone 250*200*500	0,150
3	ISO	canapulo sfuso	0,180
4	VAR	biomattone 250*200*500	0,100
5	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018

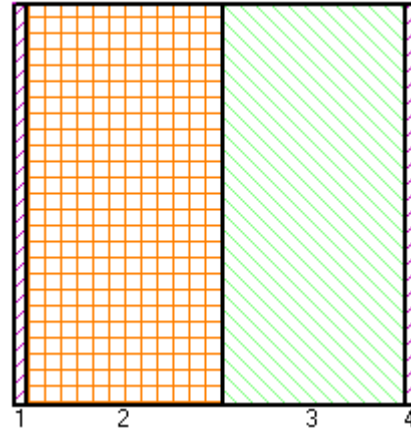
La seconda stratigrafia rappresenta è quella che integra l'uso di un mattone in laterizio forato ad un pannello isolante artificiale di polistirene espanso:

2) Struttura B2: Muratura di tamponamento con isolamento artificiale con U=0,13 W/m^{2}K

Dati generali	
Spessore:	0,536 m
Trasmittanza:	0,13 W/m²K

	Tipo di materiale	Materiale	Spessore [m]
		Superficie esterna	
1	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018
2	MUR	Laterizi forati sp.25 cm.rif.1.1.16	0,250
3	ISO	PSE in lastre ricavate da blocchi conforme a UNI 7819	0,250
4	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018

La terza stratigrafia esposta è quella che integra l'uso di un mattone in laterizio forato ad un pannello isolante naturale in sughero:

3) Struttura B3: Muratura di tamponamento con isolamento naturale con U=0,13 W/m^{2}K

Dati generali	
Spessore:	0,616 m
Trasmittanza:	0,13 W/m²K

	Tipo di materiale	Materiale	Spessore [m]
		Superficie esterna	
1	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018
2	MUR	Laterizi forati sp.30 cm.rif.1.1.17	0,300
3	ISO	Sughero	0,280
4	VAR	intonaco di calce e sabbia	0,018

Le configurazioni delle singole stratigrafie sono uguali per entrambi i valori di trasmittanza, cambiano solo gli spessori dei materiali isolanti. Per quanto riguarda la configurazione del muro di tamponamento con il biomattone c'è una piccola modifica: ovvero l'isolante in canapulo sfuso viene inserito nell'intercapedine, tra due biomattoni rispettivamente da 10 cm e 15 cm. Inoltre, anche per questa trasmittanza la tipologia e la quantità di intonaco in calce e sabbia utilizzata nelle tre stratigrafie è la stessa. Per calcolare gli impatti di questi pacchetti stratigrafici sono stati costruiti, nel Simapro, i sei processi e poiché l'unità di misura dei dati dei materiali è espressa in kg abbiamo moltiplicato ogni valore di spessore del materiale con il relativo peso specifico. Di seguito sono rappresentati i passaggi analitici per ognuno di essi:

STRUTTURA A1:

- Intonaco di calce e sabbia: 0,036 m *1m^2* 1350 kg/m^3 = 48,6 kg;
- Biomattone da 21,5 cm: 0,215 m *1m^2* 300 kg/m^3 = 64.5 kg.

Peso totale: 113,1 kg.

STRUTTURA A2:

- Intonaco di calce e sabbia: 0,036 m *1m^2* 1350 kg/m^3 = 48,6 kg;
- Laterizio forato: 0,2 m *1m^2* 750 kg/m^3 = 150 kg;
- Pannello polistirene espanso: 0,08 m *1m^2* 30 kg/m^3 = 2,4kg.

Peso totale: 201 kg.

STRUTTURA A3:

- Intonaco di calce e sabbia: 0,036 m *1m^2* 1350 kg/m^3 = 48,6 kg;
- Laterizio forato: 0,2 m *1m^2* 750 kg/m^3 = 150 kg;
- Pannello in sughero: 0,094 m *1m^2* 130 kg/m^3 = 12,22 kg.

Peso totale: 210,82 kg.

STRUTTURA B1:

- Intonaco di calce e sabbia: 0,036 m *1m^2* 1350 kg/m^3 = 48,6 kg;
- Biomattone da 25 cm: 0,250 m *1m^2* 300 kg/m^3 = 75 kg;
- Canapulo sfuso: 0,18 m *1m^2* 100 kg/m^3 = 18 kg.

Peso totale: 141,6 kg.

STRUTTURA B2:

- Intonaco di calce e sabbia: 0,036 m *1m^2* 1350 kg/m^3 = 48,6 kg;
- Laterizio forato: 0,25 m *1m^2* 750 kg/m^3 = 187,5 kg;
- Pannello polistirene espanso: 0,25 m *1m^2* 30 kg/m^3 = 7,5 kg.

Peso totale: 243,6 kg.

STRUTTURA B3:

- Intonaco di calce e sabbia: 0,036 m *$1m^2$* 1350 kg/m^3 = 48,6 kg;
- Laterizio forato: 0,3 m *$1m^2$* 750 kg/m^3 = 225 kg;
- Pannello in sughero: 0,28 m *$1m^2$* 130 kg/m^3 = 36,4 kg.

Peso totale: 310 kg.

6.4 Creazione dei processi in Simapro

Per l'intonaco di calce e sabbia, comune a tutte le stratigrafie, è stato creato un processo ex-novo nel Simapro. Per ottenere 1 kg di intonaco sono stati aggiunti:

- 0,2 di acqua;
- 0,4 di calce idraulica;
- 0,4 di sabbia;

selezionando, da database Ecoinvent, le seguenti schede:

- Tap water, at user/RER U, per il consumo di acqua;
- Lime, hydraulic, at plant/CH U, per l'impiego della calce idraulica;
- Sand I, per l'utilizzo della sabbia;

seguendo dunque la ricetta indicata in letteratura per gli intonaci tipo BIO-E/P1. Questo tipo di intonaco, impiegato dall'azienda Equilibrium per la realizzazione di interni ed esterni, è un intonaco traspirante formulato con calce idraulica naturale certificata BIO-E NHL 5 e inerti selezionati. Gli 0,018 m di spessore di intonaco comprendono le tecniche di rinzaffo, intonacatura e rasatura, tutte effettuate con un materiale a base di calce idraulica, sabbia e acqua. Si suppone, per la costruzione di $1m^2$ di parete, un miscelazione manuale dei componenti dell'intonaco e quindi senza consumo energetico.

Una volta creato il processo per l'intonaco, per ogni tipologia di struttura sono state selezionate le voci dei materiali utilizzati e i rispettivi pesi, in kg, calcolati in precedenza. Da database, come dati secondari, sono stati selezionate le seguenti voci:

- Laterizio forato: Brick, at plant/RER U;
- Pannello polistirene espanso: Polystyrene foam slab, at plant/RER U;
- Pannello in sughero: Cork slab, at plant/RER U;

Mentre per il biomattone ed il canapulo sono stati selezionati i processi creati precedentemente.

6.5 Valutazione degli impatti

Lo studio dell'impatto delle sei stratigrafie e i relativi rilasci nell'ambiente è stato svolto allo scopo di quantificare le emissioni prodotte per la fase di costruzione di 1 m^2 di parete. Il risultato è una comparazione dei sei muri a parità di trasmittanza.
Gli indicatori utilizzati per questo tipo di analisi sono: Greenhouse Gas Protocol, Cumulative Energy Demand e Ecoindicator 99 (H).

6.5.1 Greenhouse Gas Protocol

Il Greenhouse Gas Protocol permette di quantificare, per l'effetto serra, gli impatti dovuti alla fase di costruzione di queste pareti e quindi all'impiego dei materiali utilizzati.
Di seguito è riportata una tabella che indica i valori di kg di CO_2-eq divisi per i quattro componenti di anidride carbonica:

- carbonio proveniente da combustibili fossili (Fossil CO_2);
- carbonio proveniente da fonti biogeniche come piante e alberi (Biogenic CO_2 eq);
- carbonio proveniente da trasformazioni del territorio, ovvero gli impatti diretti (CO_2 eq from land transformation);
- assorbimento di carbonio dalle piante ed dagli alberi in fase di crescita (CO_2 uptake).

I muri presi in considerazione sono: A1, A2, A3, quindi per trasmittanze U= 0,34 W/m^2*K:

Categoria d'impatto	Unità	A1	A2	A3
Totale	kg	12,821	59,341	41,304
Fossil CO2 eq	kg	34,488	62,099	66,333
Biogenic CO2 eq	kg	0,559	0,330	7,592
CO2 eq from land transformation	kg	0,001	0,001	0,001
CO2 uptake	kg	-22,226	-3,088	-32,622

TABELLA-1 KG DI CO_2-EQ DIVISI PER I QUATTRO COMPONENTI DI ANIDRIDE CARBONICA

Confrontando questi primi risultati, in tabella 1, per le tre pareti è possibile notare che il valori di CO_2-eq fossile, maggiori appartengono ai muri con isolamento sintetico e naturale con una differenza davvero minima tra le due pareti. Questo è dovuto al ciclo di produzione dei mattoni e dei pannelli isolanti. Il valore di CO_2-eq uptake, per la fase di crescita delle piante, invece assume notevoli differenze da muro a muro. L'alta quantità di canapa contenuta nel biomattone, che in fase di crescita assorbe CO_2 dall'atmosfera, produce un elevato valore di questo contributo di CO_2 che sommata agli altri kg di anidride carbonica fa si che il valore d'impatto totale per questo gas serra, sia di molto inferiore alle alternative classiche proposte. Alla parete che utilizza il sughero, anch'esso un isolante naturale, la CO2 uptake è notevolmente inferiore alle altre alternative proposte provocando perciò un abbassamento del livello di anidride carbonica totale e di conseguenza limitando i contributi della componente fossile e biogenica. Nella stratigrafia che utilizza un isolamento sintetico, invece, non avendo materiale naturale, la CO_2 uptake è molto vicino allo zero rendendo perciò l'impatto complessivo della parete il più alto, quasi 5 volte quello trovato con il biomattone. Da questa analisi si evince dunque che la stratigrafia che utilizza il biomattone è quella con impatti minori e quindi la più ecocompatibile. Di seguito è mostrato in figura 1 un riassunto grafico di quello analizzato fino ad ora.

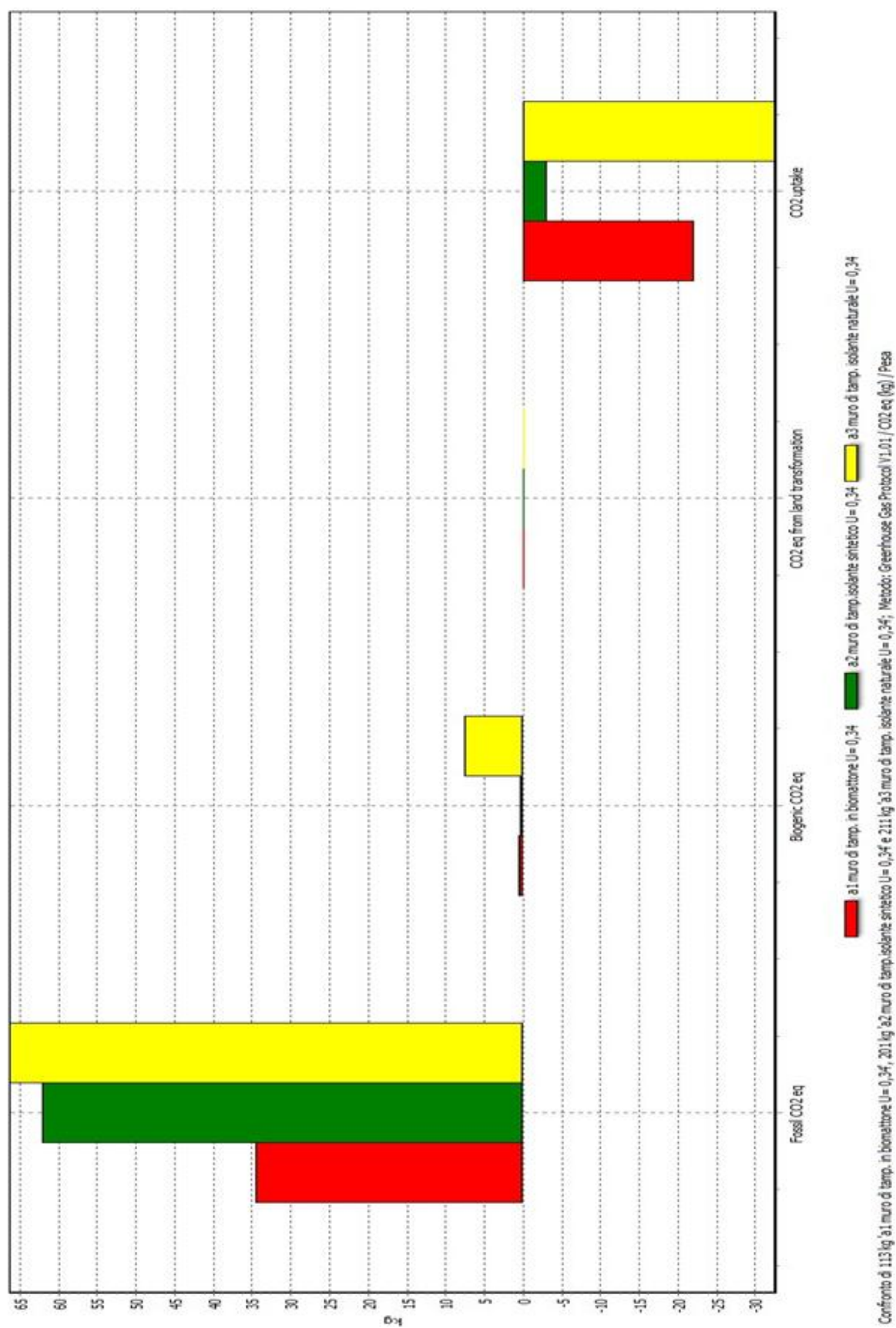



FIG-1 KG DI CO_2-EQ DIVISI PER I QUATTRO COMPONENTI DI ANIDRIDE CARBONICA

Passando ad analizzare i le pareti: B1, B2, B3, quindi per trasmittanze U= 0,13 W/m^2*K, i risultati sono i seguenti:

Categoria d'impatto	Unità	B1	B2	B3
Totale	kg	-19,00	89,01	42,03
Fossil CO2 eq	kg	39,27	92,33	112,41
Biogenic CO2 eq	kg	0,67	0,59	22,26
CO2 eq from land transformation	kg	0,00	0,00	0,00
CO2 uptake	kg	-58,93	-3,91	-92,64

TABELLA-2 KG DI CO_2-EQ DIVISI PER I QUATTRO COMPONENTI DI ANIDRIDE CARBONICA

La tabella 2 in realtà conferma quanto visto in precedenza e fornisce inoltre delle indicazioni interessanti. La stratigrafia con l'isolante sintetico resta quella con un impatto sull'ambiente maggiore delle altre due: il suo aumento, rispetto al precedente, dipende dal fatto che viene inserita una quantità di isolante maggiore. Per le altre due pareti invece, B1 e B3, l'aumento quantitativo di materiale di origine naturale porta rispettivamente ad una diminuzione di anidride carbonica totale nel primo caso e ad un valore stazionario nel secondo caso. Questo è dovuto al fatto che, impiegando più materiale naturale, il valore di CO_2 uptake è sempre più negativo e nella somma con gli altri indicatori fa diminuire il valore d'impatto finale. Da evidenziare infatti sono i kg totali di anidride carbonica del muro in biomattone: l'utilizzo di canapulo come isolante aumenta la CO_2 assorbita dalla canapa in fase di crescita e di conseguenza i kg di CO_2 uptake sono sempre più negativi. Questo porta ad ottenere un impatto, per l'effetto serra, totale negativo sull'ambiente.
Per la parete in sughero, che utilizza un elevato quantitativo di sughero e mattoni, sono associati un elevato valore di CO_2 fossile da una parte e di CO_2 biogenica dall'altra. Anche in questo caso il fattore altamente negativo della CO_2 uptake controbilancia il contributo fossile e biogenico rendendo quasi nulla la variazione dell'impatto totale rispetto al sistema A3 di trasmittanza pari a 0,34 W/m^2*K. Di seguito, in figura 2 è rappresentato un grafico di quello analizzato fino ad ora.

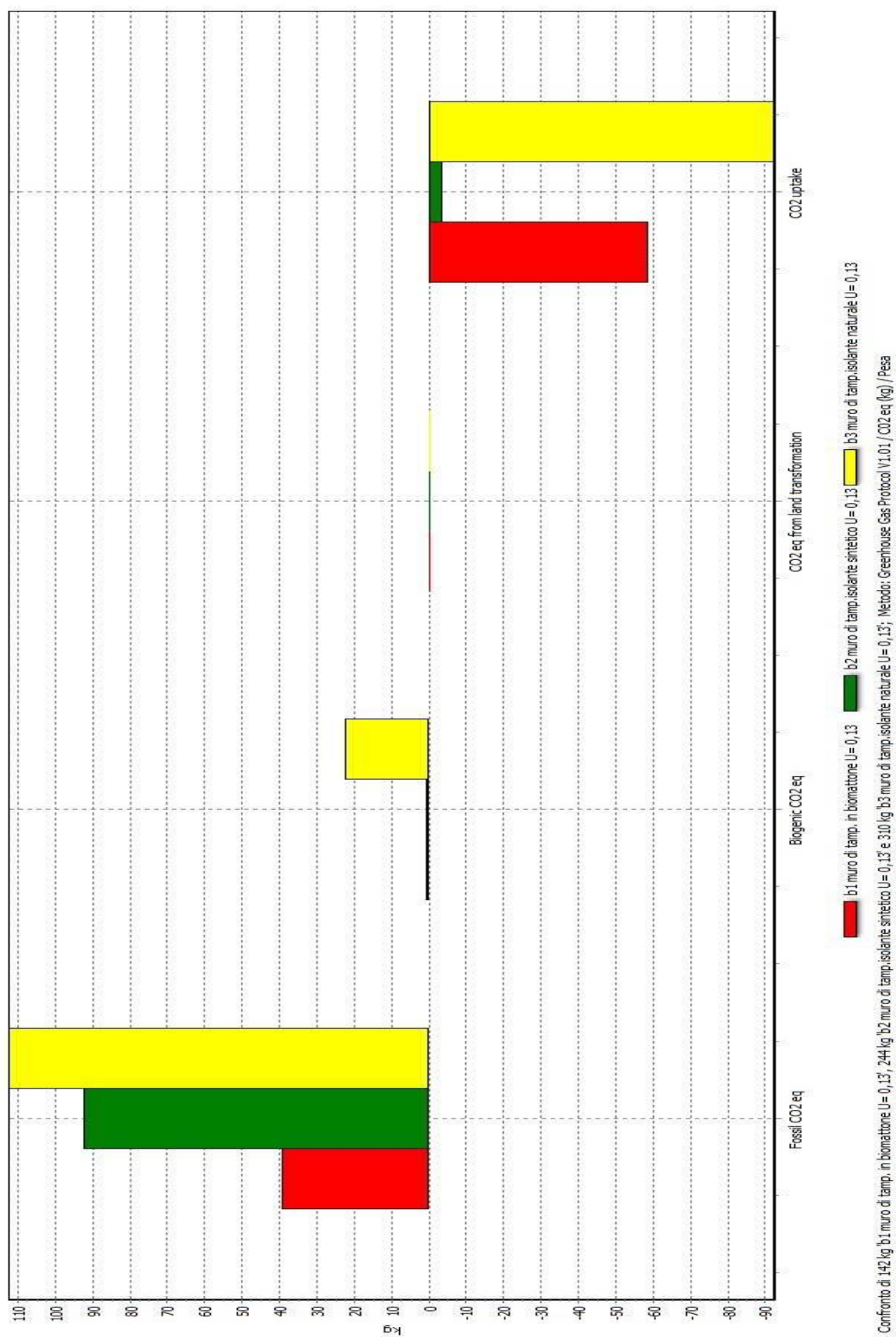



FIG-2 KG DI CO_2-EQ DIVISI PER I QUATTRO COMPONENTI DI ANIDRIDE CARBONICA

6.5.2 Cumulative Energy Demand

Oltre all'effetto serra generato dalle tre pareti è stata valutata anche la loro domanda di energia, ovvero è stata quantificata l'energia necessaria per la realizzazione delle stesse.
Ricordiamo che questo indicatore è un metodo che permette di valutare i consumi energetici di un processo produttivo focalizzandosi sull'analisi dell'impiego delle risorse energetiche così suddivise:
- energia non rinnovabile, fossile;
- energia non rinnovabile, nucleare;
- energia rinnovabile, biomasse;
- energia rinnovabile, eolica, geotermica e solare;
- energia rinnovabile, idroelettrica.

Di seguito è riportata la tabella 3 che indica i valori, in MJ, della domanda cumulativa di energia.
I muri presi in considerazione sono: A1, A2, A3, quindi per trasmittanze U= 0,34 W/m^2*K:

Categoria d'impatto	Unità	A1	A2	A3
Totale	MJ	480,73	775,85	1160,94
Non renewable, fossil	MJ	220,21	671,03	677,09
Non-renewable, nuclear	MJ	32,13	59,59	107,66
Non-renewable, biomass	MJ	0,004	0,001	0,001
Renewable, biomass	MJ	218,73	34,55	358,05
Renewable, wind, solar, geothe	MJ	0,16	0,74	1,75
Renewable, water	MJ	9,49	9,94	16,40

TABELLA-3 MJ DELLE TRE PARETI PER LE SEI COMPONENTI ENERGETICHE

In tutte le stratigrafie i valori di energia totale sono tutti positivi. L'energia di origine fossile è più alta nel muro con l'isolamento artificiale e sintetico rispetto al muro in biomattone. Inoltre per la presenza della canapa la parete in biomattone ha un elevato contributo di energia rinnovabile da biomassa piuttosto elevato rendendo questa parete ambientalmente meno impattante rispetto alle altre alternative proposte. Da notare che alla stratigrafia A3 è associato un valore di energia totale più alta perché integra ad un consumo di energia fossile elevato, un contributo di energia

rinnovabile da biomassa anch’esso elevato. Questo è dipeso dal fatto che il sughero essendo un materiale di origine naturale, come la canapa, ha una elevata energia indiretta cioè la quota parte di energia stoccata nel prodotto e pronta per essere consumata. Quindi la parete in biomattone continua ad essere la meno impattante, seguita dalla stratigrafia isolata con il sughero. La parete isolata artificialmente nonostante abbia un consumo energetico totale inferiore della parete in sughero è quella ambientalmente più impattante poiché ha un contributo di energia da biomassa piuttosto piccolo. Di seguito è mostrato, in figura 3, un grafico che schematizza quanto analizzato fino ad ora.

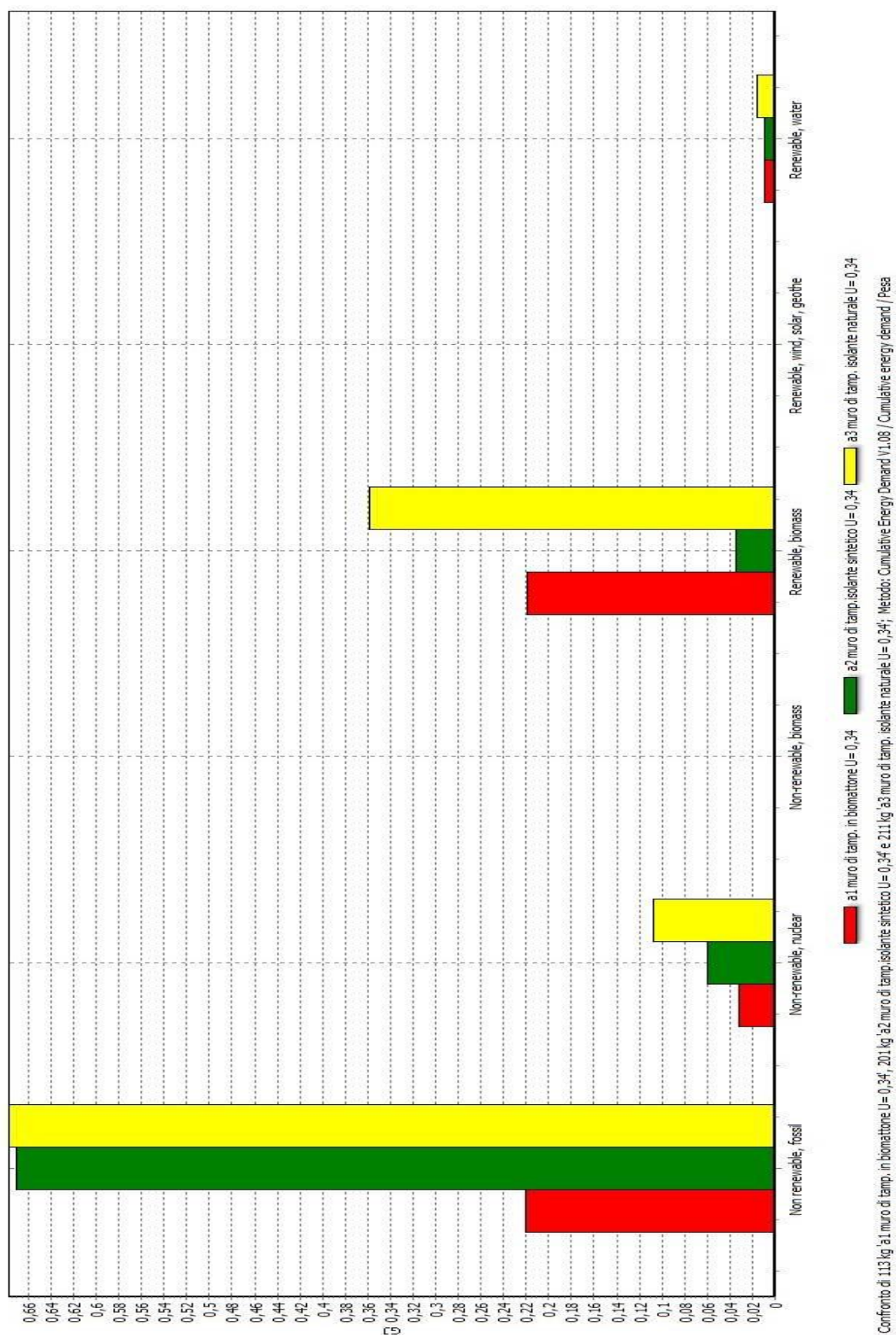



FIG-3 MJ DELLE TRE PARETI PER LE SEI COMPONENTI ENERGETICHE

Passando ad analizzare le pareti: B1, B2, B3, quindi per trasmittanze U= 0,13 W/m^2*K, i risultati sono i seguenti:

Categoria d'impatto	Unità	B1	B2	B3
Totale	MJ	928,63	1422,67	2639,00
Non renewable, fossil	MJ	299,49	1258,57	1331,50
Non-renewable, nuclear	MJ	38,38	104,14	252,43
Non-renewable, biomass	MJ	0,01	0,00	0,00
Renewable, biomass	MJ	579,36	44,56	1016,46
Renewable, wind, solar, geothe	MJ	0,23	1,20	4,31
Renewable, water	MJ	11,16	14,20	34,30

TABELLA-4 MJ DELLE TRE PARETI PER LE COMPONENTI ENERGETICHE

La prima cosa da evidenziare è che come a queste stratigrafie, con U= 0,13 W/m^2*K, caratterizzata da una massa superiore, sia associato un consumo di energia superiore.

La tabella 4 conferma quanto scritto in precedenza per i muri di trasmittanza più grande. Ossia che alle stratificazioni isolate con materiale sintetico e artificiale spettano i valori più alti di energia fossile. Al muro in biomattone, data l'elevata quantità di canapulo impiegata, i consumi energetici da fonte rinnovabile da biomassa sono più del doppio rispetto alla configurazione precedente anche se continuano ad essere inferiori rispetto alla parete in sughero. La quale detiene, come in precedenza, il valore di energia da biomassa e fossile più alta. La stratigrafia con l'isolamento in sughero perciò richiede il più alto consumo di energia totale, anche se una quota parte piuttosto elevata deriva dall'energia da biomassa. Per la parete A2 i consumi energetici totali si concentrano principalmente sul contributo fossile e questo comporta l'impatto ambientale più elevato dell'intero pacchetto stratigrafico. Anche in questo caso la figura 4 mostra quello analizzato fino ad ora.

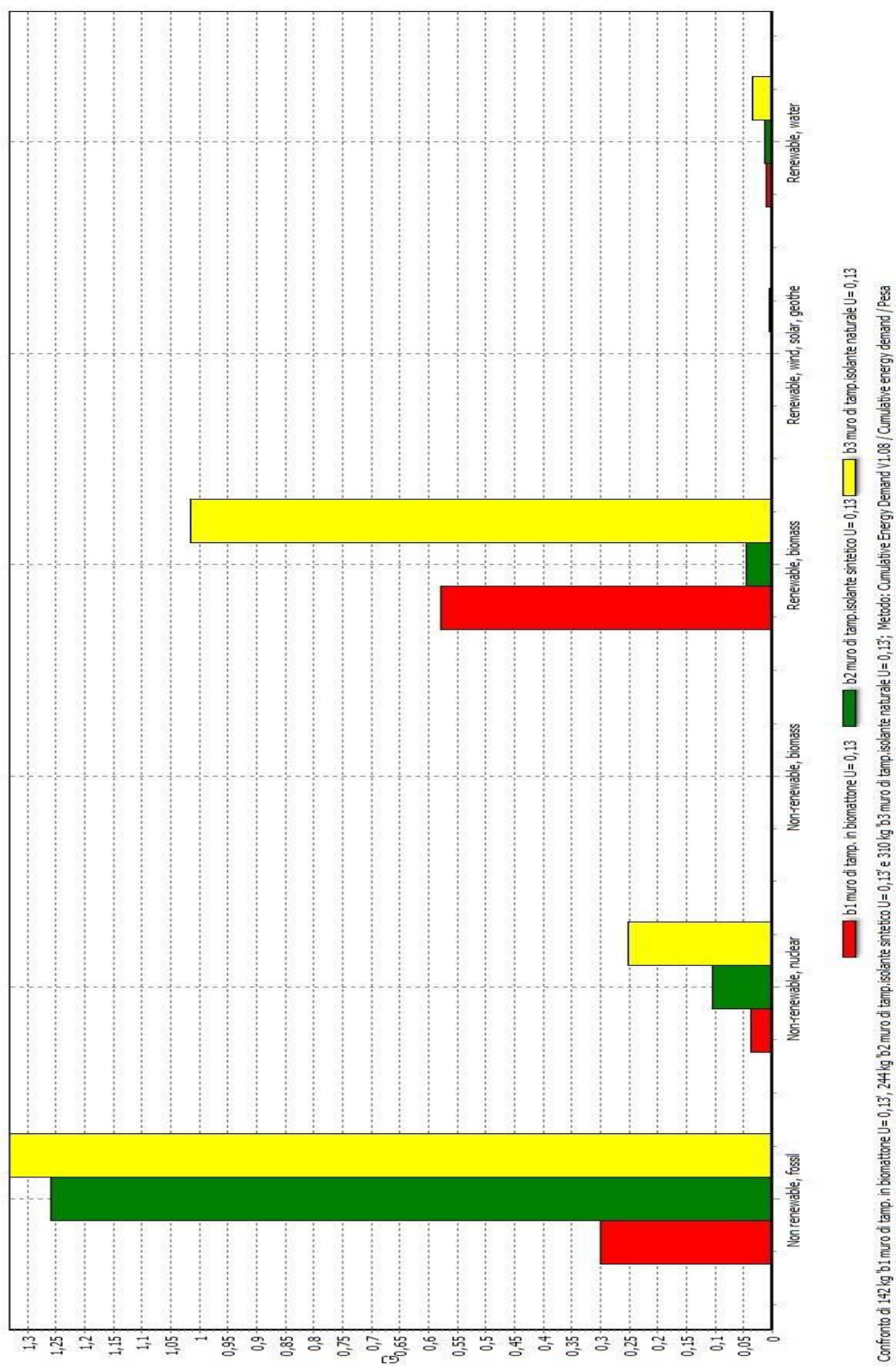



FIG-4 MJ DELLE TRE PARETI PER LE SEI COMPONENTI ENERGETICHE

6.5.3 Ecoindicator 99 (H)

Infine è stato preso in considerazione un indicatore che tiene conto di differenti categorie d'impatto (indicatore aggregato), come spiegato nel Capitolo 2.

Nella tabella seguente sono riportati i valori disaggregati delle categorie d'impatto per le tre stratigrafie con trasmittanza pari a 0,34 W/m^2*K.

Categoria d'impatto	Unità	A1	A2	A3
Totale	Pt	1,628	4,481	5,200
Carcinogens	Pt	0,020	0,025	0,060
Resp. organics	Pt	0,001	0,003	0,002
Resp. inorganics	Pt	0,364	0,685	0,953
Climate change	Pt	0,247	0,443	0,475
Radiation	Pt	0,002	0,004	0,008
Ozone layer	Pt	0,000	0,000	0,000
Ecotoxicity	Pt	0,014	0,026	0,040
Acidification/ Eutrophication	Pt	0,029	0,050	0,064
Land use	Pt	0,037	0,035	0,582
Minerals	Pt	0,009	0,021	0,040
Fossil fuels	Pt	0,905	3,189	2,975

TABELLA-5 PUNTEGGIO DISAGGREGATO DELLE CATEGORIE D'IMPATTO PER I TRE MURI

Dalla tabella 5 risulta preponderante l'impatto derivante dal consumo di combustibili fossili, rilevanti anche gli apporti derivanti dagli inquinanti inorganici e dal cambiamento climatico. Inoltre appare evidente che alla parete in biomattone corrispondono gli impatti minori.

Di seguito è mostrato, in figura 5, il grafico di confronto delle tre pareti.

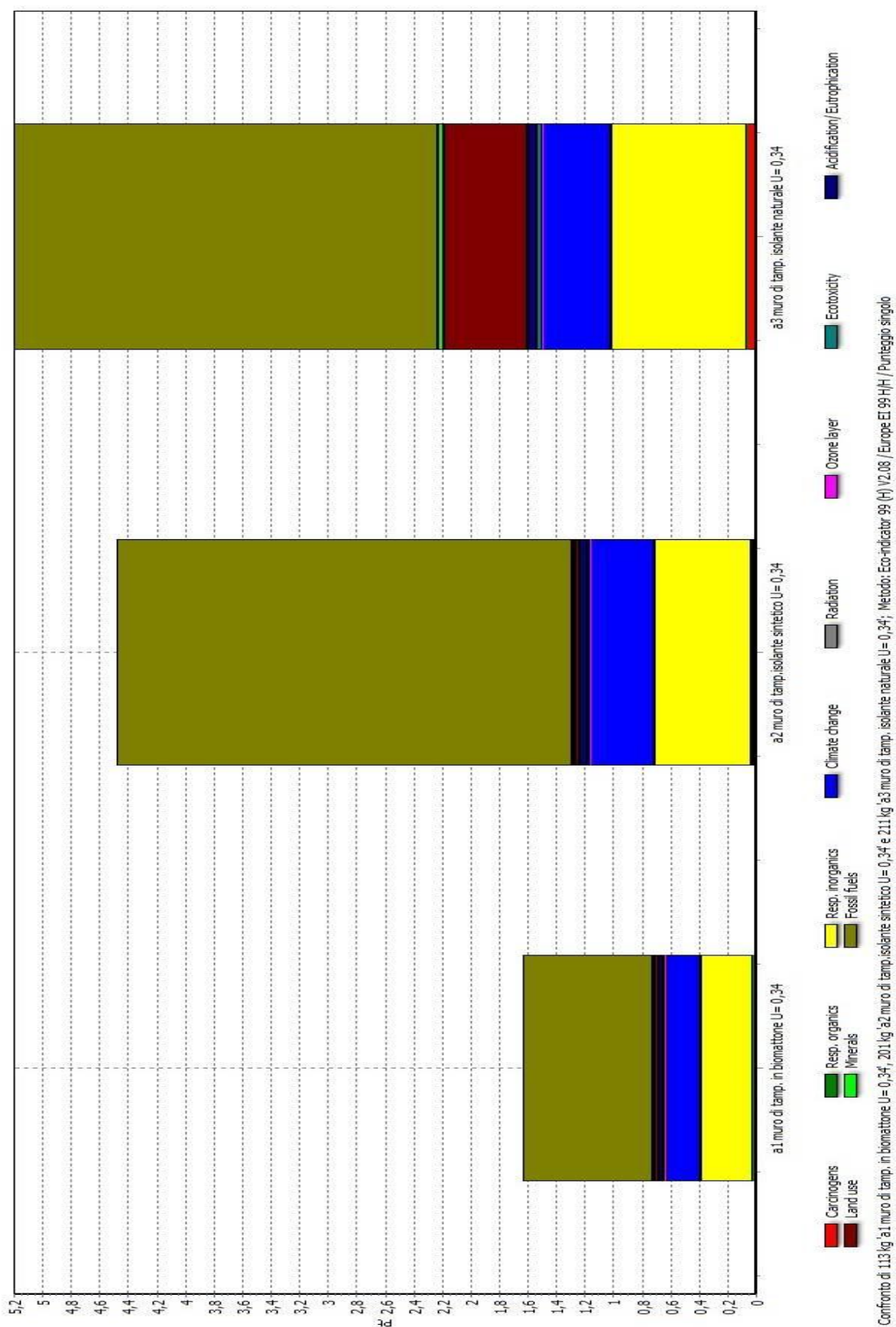



FIG-5 PUNTEGGIO DISAGGREGATO DELLE CATEGORIE D'IMPATTO PER I TRE MURI

Di seguito è riportata la tabella 6 riguardante le stratigrafie con trasmittanza pari a 0,13 W/m^2*K:

Categoria d'impatto	Unità	B1	B2	B3
Totale	Pt	2,232	8,112	10,678
Carcinogens	Pt	0,040	0,041	0,150
Resp. organics	Pt	0,001	0,007	0,004
Resp. inorganics	Pt	0,469	1,054	1,942
Climate change	Pt	0,281	0,656	0,805
Radiation	Pt	0,003	0,005	0,018
Ozone layer	Pt	0,000	0,000	0,000
Ecotoxicity	Pt	0,019	0,055	0,098
Acidification/ Eutrophication	Pt	0,036	0,074	0,124
Land use	Pt	0,076	0,044	1,682
Minerals	Pt	0,014	0,028	0,088
Fossil fuels	Pt	1,295	6,148	5,767

TABELLA-6 PUNTEGGIO DISAGGREGATO DELLE CATEGORIE D'IMPATTO PER I TRE MURI

Anche in questo caso gli apporti principali sono quelli derivanti dall'impiego di combustibili fossili, di inquinanti inorganici e dal cambiamento climatico. La parete in biomattone continua ad essere il sistema meno impattante. Il grafico sottostante, in figura 6, sintetizza i punteggi esposti.

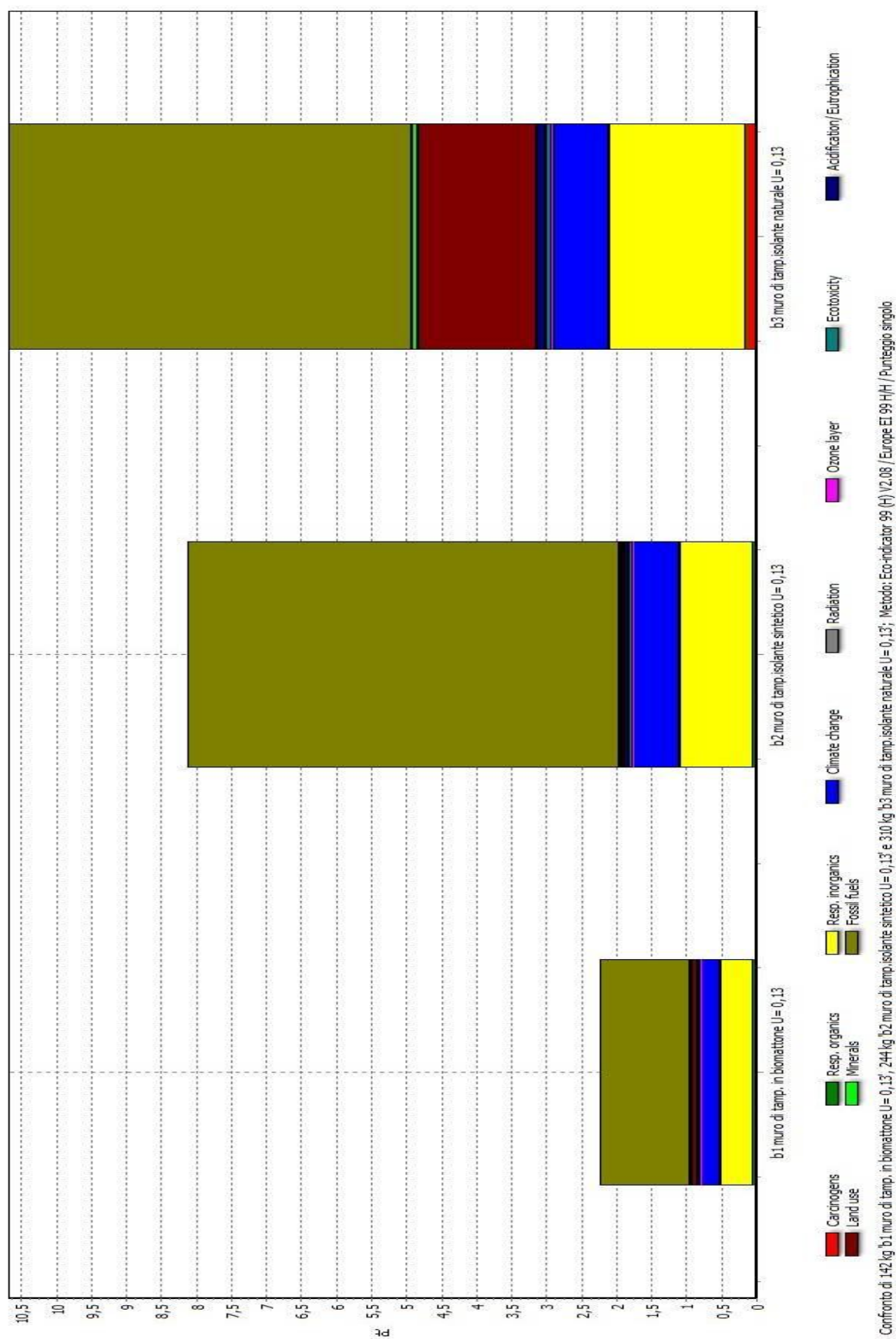



FIG-5 PUNTEGGIO DISAGGREGATO DELLE CATEGORIE D’IMPATTO PER I TRE MURI

6.6 LCA del sistema parete

Questa seconda analisi invece riguarda uno studio LCA dedicato alla fase di consumo energetico delle stratigrafie precedentemente analizzate. Per quattro zone climatiche, sono stati calcolati i valori di richiesta di energia primaria per il riscaldamento (correlati a quelle trasmittanze) con l'intento di determinare gli impatti ambientali associati e il tempo di recupero degli stessi.

6.6.1 Definizione degli scopi, unità funzionale e confini del sistema

Anche in questo secondo caso, si tratta di effettuare un'analisi comparativa delle diverse tipologie di stratigrafie, considerando in questo caso non solo l'impatto dovuto all'applicazione del materiale ma anche quello dovuto al consumo termico associato. Il confronto tra muri con trasmittanze differenti da una parte evidenzia i benefici ambientali che si possono avere quando si utilizza meno materiale isolante, dall'altro l'impiego di più materiale isolante richiede un consumo termico associato inferiore che nel tempo porta ad un recupero significativo degli impatti.
L'unità funzionale rimane invariata così come i flussi di riferimento.
Per i confini del sistema rimane valida l'analisi di inventario dello studio precedente con l'aggiunta del dato di consumo termico per le pareti analizzate.

6.6.2 Qualità dei dati

In questo caso i dati in aggiunta, relativi ai consumi di gas per i riscaldamento, sono forniti da letteratura (dati secondari).

6.6.3 Redazione dell'analisi di inventario

All'analisi di inventario precedente si devono integrare i dati energetici per il riscaldamento.

La formula per calcolare questo tipo di consumo deriva dal prodotto di tre parametri:

- trasmittanza;
- m^2 di parete;
- gradi giorno, divisi per località.

Per *gradi giorno* di una località s'intende la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente e la temperatura media esterna giornaliera; l'unità di misura utilizzata è il **grado giorno** (GG, K*d).

In termini matematici i *gradi giorno* si esprimono come:

$$GG = \sum_{e=1}^{n} (T_0 - T_e)$$

dove:

- n: numero di giorni del periodo convenzionale di riscaldamento;
- T_0: temperatura ambiente convenzionale;
- T_e: temperatura media esterna giornaliera;

- $1 \leq n \leq 365$;
- $T_e \leq T_0$.

In Italia il periodo d'osservazione, secondo la convenzione dettata dalla legge del 26 agosto 1993, n. 412, è pari a un anno, mentre la temperatura ambiente convenzionale è fissata a 20°C; quindi:

$$GG = \sum_{e=1}^{365} (20 - T_e)$$

I Gradi Giorno sono annui, quindi il valore che si ottiene è un valore di energia primaria annuale associata alla dispersione del muro.

Analizzando quattro zone climatiche, di seguito sono elencati i Gradi Giorno delle località prese in considerazione in questo studio L.C.A.:

Zona climatica NORD (zona montana): 3000, GG;
Zona climatica NORD (zona padana): 2400, GG;
Zona climatica CENTRO: 1600, GG;
Zona climatica SUD: 800, GG.

Una volta individuate le fasce climatiche di interesse, occorre calcolare gli impatti associati ai consumi di energia primaria per il riscaldamento per un lasso di tempo di un anno,per ogni zona climatica. Così facendo è possibile calcolare il tempo di ritorno, in anni, degli impatti legati alle stratigrafie più efficienti (U=0.13) rispetto a quelle meno efficienti (U=0.34).
Le stratigrafie con U=0.13 hanno impatti maggiori, in quanto il quantitativo di materiale utilizzato è maggiore, viceversa le stratigrafie con U=0.34. Quindi, facendo un rapporto tra la differenza di impatto tra le due alternative e gli impatti annui risparmiati con la stratigrafia U=0.13 è possibile calcolare il tempo di ritorno, in anni, di questi impatti.
Prendendo in considerazione, per esempio, l'indicatore Cumulative Energy Demand:

- impatto stratigrafia con U=0.13 = B (MJ)
- impatto stratigrafia con U=0.34 = A (MJ)
- risparmio annuo impatti = C (MJ/anno)

Otteniamo:

B-A (MJ) / C (MJ/anno) = tempo di ritorno (anno).

Per poter ottenere i consumi annui per il riscaldamento relativi a un metro quadro di parete nelle diverse zone climatiche è necessario moltiplicare i gradi giorno annui per la trasmittanza del metro quadrato di parete e dividere il tutto per il rendimento dell'impianto termico (ipotizzando $\eta = 0.85$):

GG (K*d/anno) * 1/24 (h/d) * 1 (m^2) * U (W/m^2K) / η = consumi termici annui (Wh)

Il valore 0,85 può essere considerato un valore cautelativo perché normalmente gli impianti esistenti hanno efficienze largamente inferiori.

Di seguito è riportato in tabella 7 il calcolo per le diverse zone climatiche:

zona climatica	GG	U	m2	ore / giorno	rendimento	consumi wh	consumi kwh
montana	3000	0,34	1	24	0,85	28800	28,80
montana	3000	0,13	1	24	0,85	11012	11,01
padana	2400	0,34	1	24	0,85	23040	23,04
padana	2400	0,13	1	24	0,85	8809	8,81
centro	1600	0,34	1	24	0,85	15360	15,36
centro	1600	0,13	1	24	0,85	5873	5,87
sud	800	0,34	1	24	0,85	7680	7,68
sud	800	0,13	1	24	0,85	2936	2,94

TABELLA-7 CONSUMI ANNUI PER LE QUATTRO ZONE CLIMATICHE

Una volta ottenuti i consumi annui, ad essi possiamo associare degli impatti ambientali attraverso l'uso del software Simapro.
Gli impatti sono stati calcolati per i medesimi indicatori utilizzati per le stratigrafie in modo tale da poter confrontare le varie soluzioni impiantistiche nelle diverse zone climatiche.

6.7 Valutazione degli impatti

6.7.1 Greenhouse Gas Protocol

Per prima cosa vengono calcolati gli impatti, in termini di kg di CO_2 equivalente, attraverso l'indicatore Greenhouse Gas Protocol.
Tabella 8 e figura 7 mostrano i relativi impatti annuali dovuti al riscaldamento di ambienti per metro quadro di parete: è possibile notare che gli impatti sono per la quasi totalità di origine fossile. Ovviamente la zona montana presenta consumi più elevati rispetto alle altre alternative, inoltre i valori di anidride carbonica fossile e di conseguenza totale, aumentano passando da muri con trasmittanza pari a 0,13 W/m^2*K a muri con trasmittanza pari a 0,34 W/m^2*K.

Categoria d'impatto	Unità	U= 0,13 ZONA MONTANA	U= 0,13 ZONA PADANA	U= 0,13 ZONA CENTRO	U= 0,13 ZONA SUD
Totale	kg	3,0237	2,4195	1,6121	0,8074
Fossil CO2 eq	kg	3,0237	2,4195	1,6121	0,8074
Biogenic CO2 eq	kg	0,0033	0,0026	0,0018	0,0009
CO2 eq from land transformation	kg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CO2 uptake	kg	-0,0033	-0,0026	-0,0018	-0,0009
Categoria d'impatto	Unità	U= 0,34 ZONA MONTANA	U= 0,34 ZONA PADANA	U= 0,34 ZONA CENTRO	U= 0,34 ZONA SUD
Totale	kg	7,9094	6,3275	4,2184	2,1092
Fossil CO2 eq	kg	7,9094	6,3275	4,2184	2,1092
Biogenic CO2 eq	kg	0,0086	0,0069	0,0046	0,0023
CO2 eq from land transformation	kg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CO2 uptake	kg	-0,0087	-0,0069	-0,0046	-0,0023

TABELLA-8 KG DI CO_2-EQ DIVISI PER I QUATTRO COMPONENTI DI ANIDRIDE CARBONICA

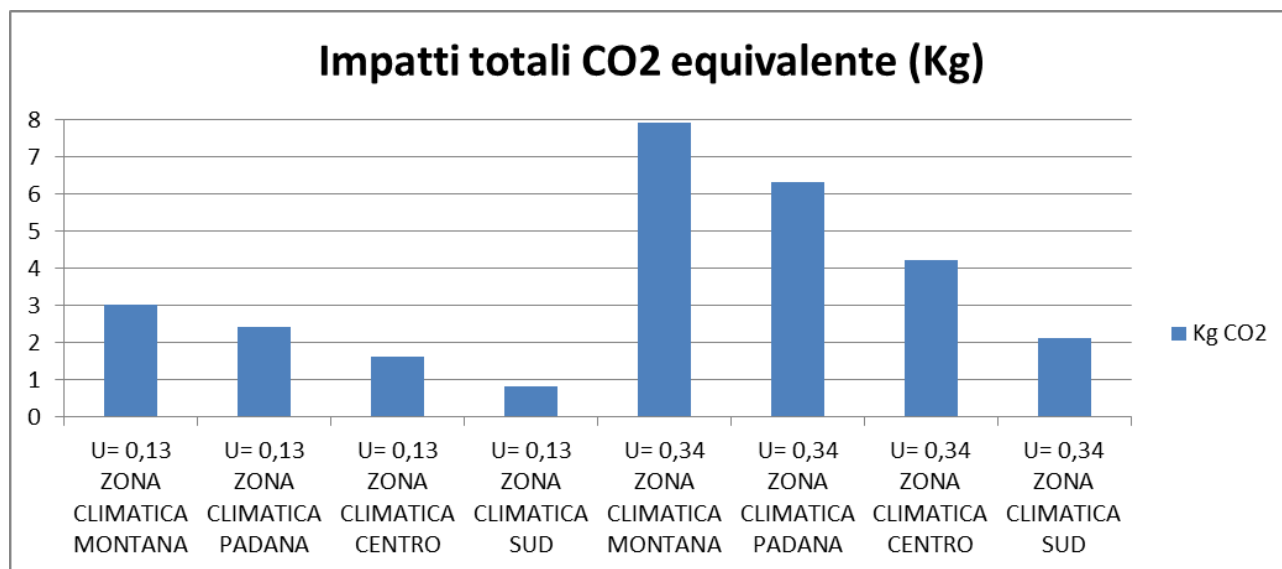



FIG-7 KG DI CO_2-EQ TOTALE PER LE DUE TRASMITTANZE NELLE QUATTRO ZONE CLIMATICHE

6.7.2 Cumulative Energy Demand

Successivamente vengono calcolati gli impatti, in termini di MJ di energia assorbita, attraverso l'indicatore Cumulative Energy Demand. Di seguito sono riportati i risultati in la tabella 9 e nella figura 8 relativi agli impatti annuali dovuti al riscaldamento di ambienti per metro quadro di parete.

Categoria d'impatto	Unità	U=0,13 ZONA MONTANA	U=0,13 ZONA PADANA	U=0,13 ZONA CENTRO	U=0,13 ZONA SUD	U= 0,34 ZONA MONTANA	U=0,34 ZONA PADANA	U=0,34 ZONA CENTRO	U=0,34 ZONA SUD
Totale	MJ	51,38	41,11	27,39	13,72	134,39	107,51	71,68	35,84
Non renewable, fossil	MJ	50,52	40,43	26,94	13,49	132,16	105,73	70,48	35,24
Non-renewable, nuclear	MJ	0,67	0,54	0,36	0,18	1,76	1,41	0,94	0,47
Non-renewable, biomass	MJ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Renewable, biomass	MJ	0,03	0,03	0,02	0,01	0,09	0,07	0,05	0,02
Renewable, wind, solar, geothe	MJ	0,01	0,01	0,01	0,00	0,03	0,03	0,02	0,01
Renewable, water	MJ	0,13	0,11	0,07	0,04	0,35	0,28	0,19	0,09

TABELLA-9 MJ DELLE DUE TRASMITTANZE, PER LE SEI TIPOLOGIE DI ENERGIA

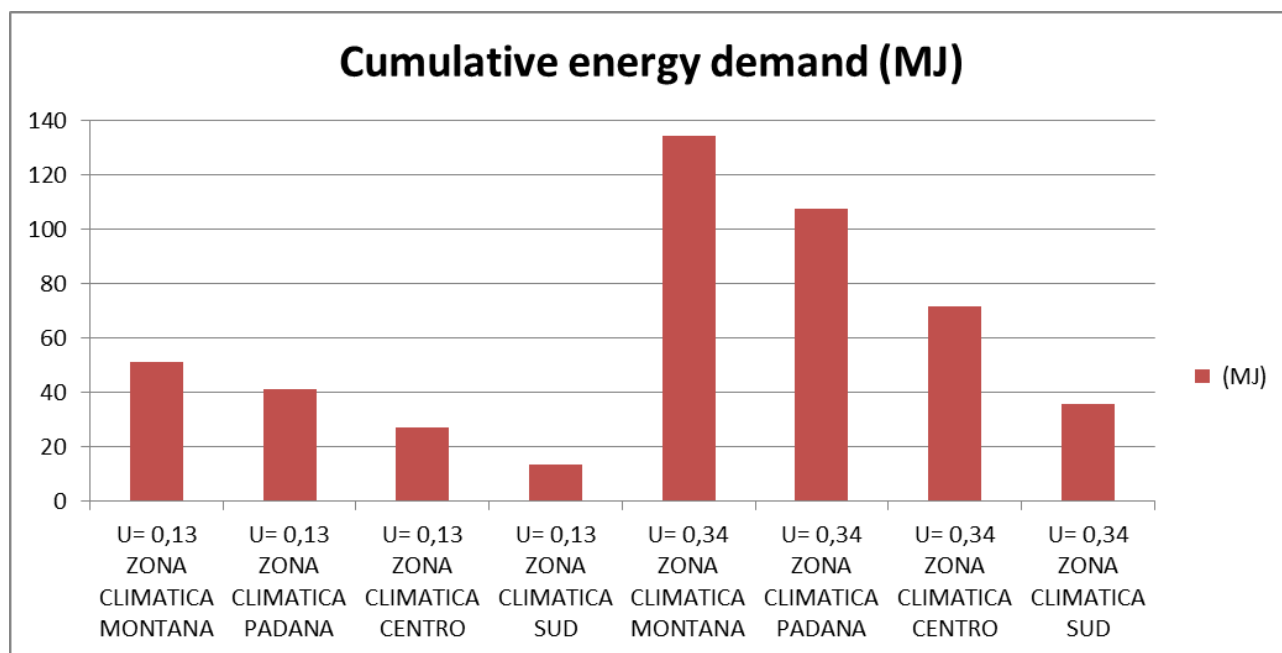



FIG-8 MJ TOTALI PER LE DUE TRASMITTANZE IN ZONE CLIMATICHE DIFFERENTI

Anche in questo caso dalla zona montana alle altre i consumi di energia di origine fossile diminuiscono. Importante evidenziare che il consumo di energia per il riscaldamento è anche in funzione della trasmittanza, quindi il valore di energia fossile aumenta se si passa da una trasmittanza 0,13 W/m^2*K a 0,34 W/m^2*K.

6.7.3 Ecoindicator 99 (H)

Infine vengono calcolati gli impatti, in termini di punteggio singolo aggregato, attraverso l'indicatore Ecoindicator**.** Di seguito, in tabella 10 e nel grafico di figura 9 sono riportati i relativi valori degli impatti annuali dovuti al riscaldamento di ambienti per un metro quadro di parete.

Categoria d'impatto	Unità	U= 0,13 ZONA MONTANA	U= 0,13 ZONA PADANA	U= 0,13 ZONA CENTRO	U= 0,13 ZONA SUD	U= 0,34 ZONA MONTANA	U= 0,34 ZONA PADANA	U= 0,34 ZONA CENTRO	U= 0,34 ZONA SUD
Totale	Pt	0,302	0,242	0,161	0,081	0,790	0,632	0,422	0,211
Carcinogens	Pt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000
Resp. organics	Pt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Resp. inorganics	Pt	0,010	0,008	0,005	0,003	0,027	0,021	0,014	0,007
Climate change	Pt	0,021	0,017	0,011	0,006	0,056	0,045	0,030	0,015
Radiation	Pt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ozone layer	Pt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ecotoxicity	Pt	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000
Acidification/ Eutrophication	Pt	0,001	0,001	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001	0,001
Land use	Pt	0,001	0,001	0,000	0,000	0,002	0,001	0,001	0,000
Minerals	Pt	0,001	0,001	0,000	0,000	0,002	0,001	0,001	0,000
Fossil fuels	Pt	0,267	0,214	0,142	0,071	0,699	0,559	0,373	0,186

TABELLA-10 PUNTEGGIO DISAGGREGATO DELLE CATEGORIE D'IMPATTO PER LE DUE TRASMITTANZE

I valori maggiori sono quelli relativi al consumo di combustibile fossile, così come ci si aspettava. Anche in questo caso la zona montana è quella che richiede più energia termica. Inoltre al valore di trasmittanza pari a 0,34 W/m^2*K sono associati i punteggi più alti.

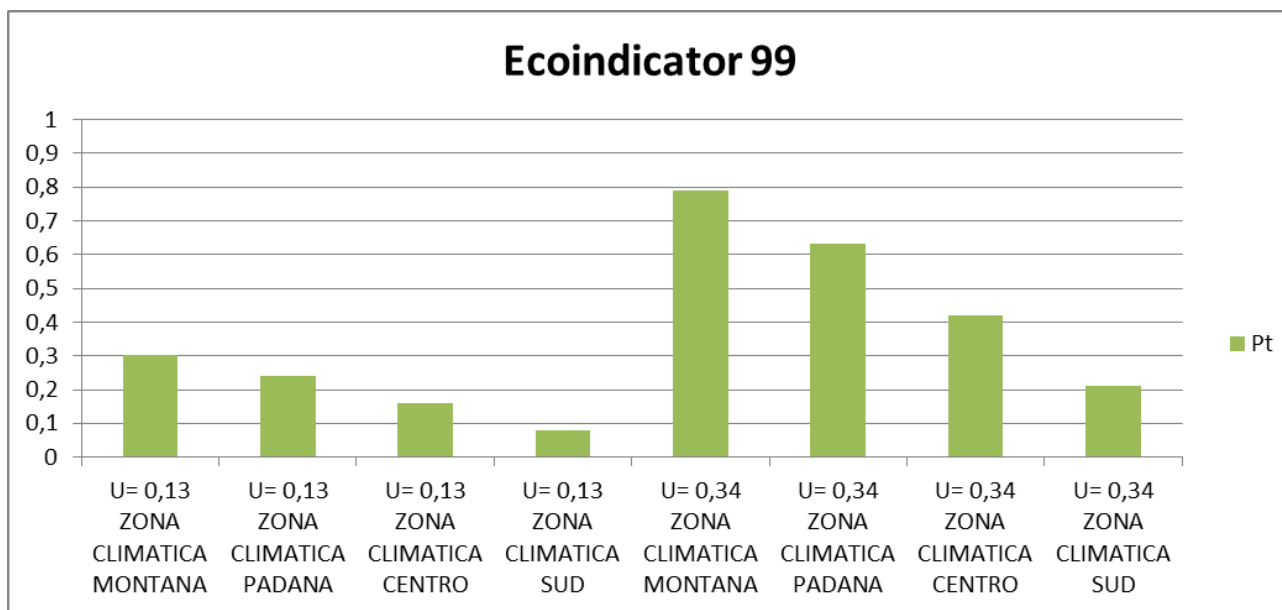



FIG-9 PUNTEGGI AGGREGATI PER DUE TRASMITTANZE NELLE QUATTRO ZONE CLIMATICHE

6.8 Tempo di ritorno degli impatti

Come precedentemente anticipato, una volta calcolati gli impatti delle diverse stratigrafie prese in esame (A1-A2-A3-B1-B2-B3) e dei consumi relativi alle diverse zone climatiche è possibile effettuare un confronto riguardante il tempo di ritorno degli impatti.

Di seguito sono riportati (in tabella 11, 12, 13 e 14) i risultati, espressi in anni, per i tre indicatori presi in considerazione:

GREENHOUSE GAS PROTOCOL:

CO2 TOTALE								
		(kg CO2 - eq)		differenza impatti	impatti annui U=0,34	impatti annui U=0,13	risparmio annuo	tempo di ritorno
zona	confronto	U=0,34	U=0,13	Kg CO2	Kg CO2 / anno	Kg CO2 / anno	Kg CO2 / anno	anno
montana	biomattone A1-B1	12,82	-19,00	-31,82	7,91	3,02	4,89	0
	sintetico A2-B2	59,34	89,01	29,66	7,91	3,02	4,89	6,07
	naturale A3-B3	41,30	42,03	0,73	7,91	3,02	4,89	0,15
padana	biomattone A1-B1	12,82	-19,00	-31,82	6,33	2,42	3,91	0
	sintetico A2-B2	59,34	89,01	29,66	6,33	2,42	3,91	7,59
	naturale A3-B3	41,30	42,03	0,73	6,33	2,42	3,91	0,19
centro	biomattone A1-B1	12,82	-19,00	-31,82	4,22	1,61	2,61	0
	sintetico A2-B2	59,34	89,01	29,66	4,22	1,61	2,61	11,38
	naturale A3-B3	41,30	42,03	0,73	4,22	1,61	2,61	0,28
sud	biomattone A1-B1	12,82	-19,00	-31,82	2,11	0,81	1,30	0
	sintetico A2-B2	59,34	89,01	29,66	2,11	0,81	1,30	22,79
	naturale A3-B3	41,30	42,03	0,73	2,11	0,81	1,30	0,56

TABELLA-11 TEMPI DI RITORNO CALCOLATI PER LA CO_2 TOTALE

Le stratigrafie A1-B1, essendo in biomattone, presentano un valore negativo di CO_2 totale dovuto alla CO_2 uptake stoccata dal canapulo in fase di crescita della pianta. Di conseguenza il tempo di ritorno degli impatti risulterà nullo. Anche se la somma totale degli impatti è negativa, rimangono gli impatti associati alla realizzazione del muro. Per questo motivo abbiamo deciso di calcolare il tempo di ritorno anche per la CO_2 di origine fossile.

CO2 FOSSILE								
		(kg CO2 - eq)		differenza impatti	impatti annui U=0,34	impatti annui U=0,13	risparmio annuo	tempo di ritorno
zona	confronto	U=0,34	U=0,13	Kg CO2	Kg CO2 / anno	Kg CO2 / anno	Kg CO2 / anno	anno
montana	biomattone A1-B1	34,49	39,27	4,78	7,91	3,02	4,89	0,98
	sintetico A2-B2	62,10	92,33	30,23	7,91	3,02	4,89	6,19
	naturale A3-B3	66,33	112,41	46,08	7,91	3,02	4,89	9,43
padana	biomattone A1-B1	34,49	39,27	4,78	6,33	2,42	3,91	1,22
	sintetico A2-B2	62,10	92,33	30,23	6,33	2,42	3,91	7,74
	naturale A3-B3	66,33	112,41	46,08	6,33	2,42	3,91	11,79
centro	biomattone A1-B1	34,49	39,27	4,78	4,22	1,61	2,61	1,83
	sintetico A2-B2	62,10	92,33	30,23	4,22	1,61	2,61	11,60
	naturale A3-B3	66,33	112,41	46,08	4,22	1,61	2,61	17,68
sud	biomattone A1-B1	34,49	39,27	4,78	2,11	0,81	1,30	3,67
	sintetico A2-B2	62,10	92,33	30,23	2,11	0,81	1,30	23,22
	naturale A3-B3	66,33	112,41	46,08	2,11	0,81	1,30	35,40

TABELLA-12 TEMPI DI RITORNO CALCOLATI PER LA CO_2 FOSSILE

CUMULATIVE ENERGY DEMAND (C.E.D.):

CED								
		MJ	MJ	differenza impatti	impatti annui U=0,34	impatti annui U=0,13	risparmio annuo	tempo di ritorno
zona	confronto	U=0,34	U=0,13	MJ	MJ / anno	MJ / anno	MJ / anno	anno
montana	biomattone A1-B1	480,73	928,63	447,90	134,39	51,38	83,02	5,40
	sintetico A2-B2	775,85	1422,67	646,82	134,39	51,38	83,02	7,79
	naturale A3-B3	1160,95	2639,01	1478,06	134,39	51,38	83,02	17,80
padana	biomattone A1-B1	480,73	928,63	447,90	107,51	41,11	66,40	6,75
	sintetico A2-B2	775,85	1422,67	646,82	107,51	41,11	66,40	9,74
	naturale A3-B3	1160,95	2639,01	1478,06	107,51	41,11	66,40	22,26
centro	biomattone A1-B1	480,73	928,63	447,90	71,68	27,39	44,28	10,11
	sintetico A2-B2	775,85	1422,67	646,82	71,68	27,39	44,28	14,61
	naturale A3-B3	1160,95	2639,01	1478,06	71,68	27,39	44,28	33,38
sud	biomattone A1-B1	480,73	928,63	447,90	35,84	13,72	22,12	20,25
	sintetico A2-B2	775,85	1422,67	646,82	35,84	13,72	22,12	29,24
	naturale A3-B3	1160,95	2639,01	1478,06	35,84	13,72	22,12	66,82

TABELLA-13 TEMPI DI RITORNO CALCOLATI PER LA CUMULATVE ENERGY DEMAND (TOTALE)

ECOINDICATOR 99 (H):

ECOINDICATOR 99								
		Pt	Pt	differenza impatti	impatti annui U=0,34	impatti annui U=0,13	risparmio annuo	tempo di ritorno
zona	confronto	U=0,34	U=0,13	PUNTEGGIO SINGOLO	Pt / anno	Pt / anno	PT/ anno	anno
montana	biomattone A1-B1	1,63	2,23	0,60	0,79	0,30	0,49	1,24
	sintetico A2-B2	4,48	8,11	3,63	0,79	0,30	0,49	7,44
	naturale A3-B3	5,20	10,68	5,48	0,79	0,30	0,49	11,22
padana	biomattone A1-B1	1,63	2,23	0,60	0,63	0,24	0,39	1,55
	sintetico A2-B2	4,48	8,11	3,63	0,63	0,24	0,39	9,30
	naturale A3-B3	5,20	10,68	5,48	0,63	0,24	0,39	14,03
centro	biomattone A1-B1	1,63	2,23	0,60	0,42	0,16	0,26	2,32
	sintetico A2-B2	4,48	8,11	3,63	0,42	0,16	0,26	13,94
	naturale A3-B3	5,20	10,68	5,48	0,42	0,16	0,26	21,03
sud	biomattone A1-B1	1,63	2,23	0,60	0,21	0,08	0,13	4,65
	sintetico A2-B2	4,48	8,11	3,63	0,21	0,08	0,13	27,91
	naturale A3-B3	5,20	10,68	5,48	0,21	0,08	0,13	42,11

TABELLA-14 TEMPI DI RITORNO CALCOLATI PER I VALORI AGGREGATI DI ECOINDICATOR 99 (H)

Per tutti gli indicatori presi in considerazione è evidente che la stratigrafia contenente biomattone presenta dei tempi di recupero degli impatti sensibilmente inferiori rispetto alle altre opzioni impiantistiche considerate. Questo è un indice di sostenibilità da tenere ben presente, soprattutto se si considera che l’orizzonte temporale di una parete può essere di 30-40 anni o anche più. Di seguito, in figura 10, sono confrontati i tempi di ritorno degli impatti per le varie stratigrafie nelle diverse condizioni climatiche analizzate.

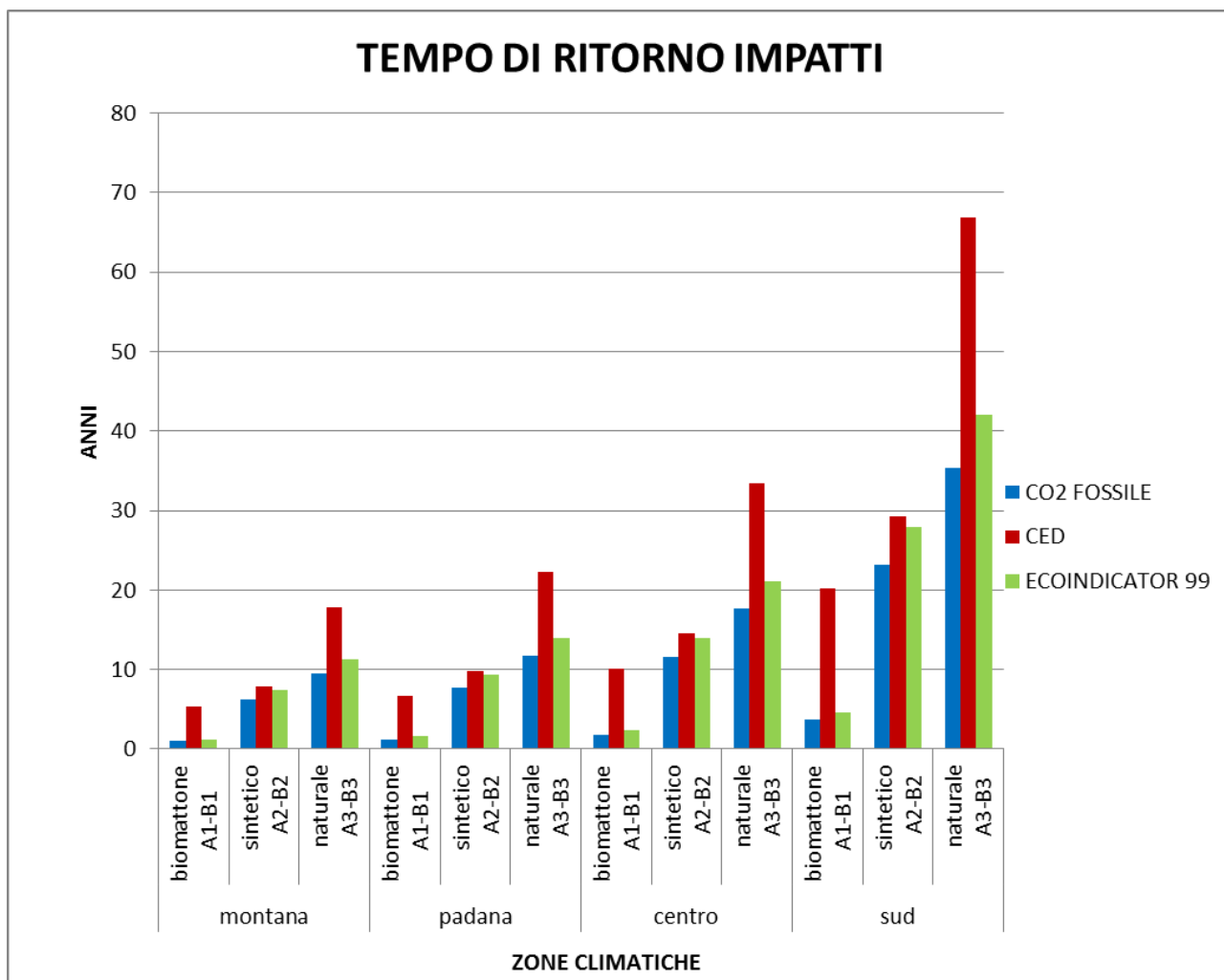



FIG-10 TEMPI DI RITORNO PER LE SEI PARETI NELLE QUATTRO ZONE CLIMATICHE

CONCLUSIONI

Il nostro lavoro di tesi ha avuto come oggetto l'analisi di un ciclo di vita del sistema produttivo dei materiali a base di calce e canapulo e successivamente la valutazione degli impatti prodotti dall'utilizzo degli stessi in sei pacchetti stratigrafici. Infine è stato quantificato il tempo in cui gli impatti ambientali, associati all'utilizzo di un maggiore quantità di isolante, vengono riassorbiti dai minori impatti legati al miglioramento delle prestazioni energetiche delle pareti stesse.

La prima fase è stata la predisposizione dell'analisi di inventario. In primo luogo è stato identificato lo schema a blocchi del processo produttivo in esame, a cui è seguito il reperimento dei dati primari direttamente in azienda, tenendo conto dei flussi di materia e dei consumi energetici specifici per le unità di processo. In secondo luogo è stata effettuata l'implementazione dei dati sul software Simapro.

Questa prima fase ci ha permesso di analizzare gli impatti associati ad ognuno dei processi a cui sono stati sottoposti i materiali; inoltre ci ha permesso di individuare i processi più impattanti, in modo da poter pianificare interventi concreti per la mitigazione degli impatti. Ad esempio abbiamo constatato che gli impatti derivanti dal trasporto della calce rappresentano una parte rilevante degli impatti ambientali totali legati all'approvvigionamento delle materie prime impiegate. Di conseguenza uno dei primi accorgimenti da adottare sarebbe quello di cambiare il sito di rifornimento della calce cercandone uno più vicino.

Passando allo studio dei prodotti finiti (biomattone, N.B. 1:1 e 2:1), la valutazione degli impatti ha evidenziato che la miscela Natural Beton 1:1 presenta, per i tre indicatori utilizzati, un impatto associato inferiore; bisogna tenere conto però che la messa in opera del Natural Beton 1:1 necessita di una struttura di sostegno, generalmente realizzata con uno scheletro in legno-alluminio e un rivestimento in pannelli di magnesite tipo Megapan. Dall'altra parte il biomattone non ha bisogno di strutture di sostegno costituendo un vero e proprio "mattone" ecologico.

L'applicazione delle diverse soluzioni tecnologiche, quindi, è da valutarsi in base all'uso specifico di cui si si necessita.

Nella seconda parte della nostra tesi abbiamo preso in considerazione sei pacchetti stratigrafici differenti in modo da poter confrontare, a parità di performance energetica, gli impatti del biomattone rispetto ad altre alternative impiantistiche più classiche.

Per poter confrontare i diversi materiali presi in esame abbiamo deciso di scegliere come parametro di comparazione la trasmittanza termica; è stato scelto di eseguire il paragone per una trasmittanza pari a 0,34 W/m^2*K (riconducibile ad una casa standard) e per una trasmittanza pari a 0,13 W/m^2*K (riconducibile ad una casa passiva).

I risultati hanno evidenziato, in particolare per l'indicatore riguardante l'emissioni di CO_2-eq, che le soluzioni impiantistiche a base di calce e canapulo presentano un valore di impatto ambientale contenuto, dovuto alla capacità della canapa di assorbire anidride carbonica in fase di crescita della pianta. Inoltre anche per gli altri indicatori considerati (Cumulative energy demand e Ecoindicator 99 H) l'impatto generato dall'impiego del biomattone risulta sensibilmente inferiore rispetto alle alternative stratigrafiche con isolante naturale e sintetico.

Nell'ultima fase della tesi abbiamo previsto l'impiego delle pareti considerate in diversi contesti climatici; individuando la differenza di impatti tra le stratigrafie con trasmittanza pari a 0,13 W/m^2*K rispetto a quelle con trasmittanza pari a 0,34 W/m^2*K: le prime presentano impatti maggiori dovuti al più massiccio impiego di materiale isolante. Da un altro aspetto però presentano dispersioni annue inferiori.

Questo ci ha permesso di poter calcolare il tempo di ammortamento del surplus di impatti legati alla soluzione più efficiente per tutte le tipologie di pareti e nelle diverse zone climatiche italiane.

Anche nelle condizioni climatiche meno favorevoli, il tempo di ritorno delle pareti in biomattone, stimato per i tre indicatori (Greenhouse Gas Protocol, Cumulative energy demand e Ecoindicator 99 H) è inferiore a 15 anni (eccetto per il C.E.D. nella zona climaticha più sfavorevole).

In conclusione, prendendo in considerazione tutti gli aspetti della sostenibilità, ovvero quello ambientale, economico e sociale possiamo affermare che i materiali di isolamento in calce-canapulo mostrano vantaggi in ogni ognuno di essi; ambientale perché dall'analisi del ciclo di vita, sia per il processo di produzione sia per la fase di posa in opera, i materiali presentano emissioni di anidride carbonica contenute e processi produttivi poco energivori; economico perché la realizzazione della parete ha costi paragonabili se non inferiori alle alternative disponibili sul mercato (vedi appendice); sociale perché i materiali in calce-canapulo hanno caratteristiche di comfort abitativo elevate, in quanto sono capaci di regolare l'umidità, assorbendola se in eccesso e rilasciandola quando l'aria è secca, proprio come un deumidificatore/umidificatore. Inoltre essendo materiali di origine naturale rappresentano un'alternativa ecosostenibile decisamente più performante rispetto ai materiali sintetici convenzionali, tutto questo al fine di soddisfare i bisogni delle attuali generazioni, evitando così di compromettere la capacità delle future di soddisfare i propri.

BIBLIOGRAFIA

- **Althaus H-J, Kellenberger D, Doka G, Künniger T. Manufacturing and Disposal of Building Materials and Inventorying Infrastructure in ecoinvent (8 pp). The International Journal of Life Cycle Assessment. 2004;10:35-42.**

- **Ardente F, Beccali M, Cellura M, Mistretta M. Building energy performance: a LCA case study of kenaf-fibres insulation board. Energy and Buildings. 2008;40:1-10.**

- **Arnaud L. Comparative study of hygro thermal performances of building materials,2009.**

- **Aste N, Adhikari RS, Buzzetti M. Beyond the EPBD: The low energy residential settlement Borgo Solare. Applied Energy. 2010;87:629-42.**

- **Balaras CA, Droutsa K, Dascalaki E, Kontoyiannidis S. Heating energy consumption and resulting environmental impact of European apartment buildings. Energy and Buildings. 2005;37:429-42.**

- **Baldo G.L., Marino M., Rossi S., 2008, Analisi del ciclo di vita LCA, Edizioni Ambiente.**

- **Bribián I.Z., Usón A.A., Scarpellini S., 2009, Life cycle assessment in buildings: state-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification, Building and Environment; 44: 2510-2520**

- **Brunklaus B, Thormark C, Baumann H. Illustrating limitations of energy studies of buildings with LCA and actor analysis. Building Research & Information. 2010;38:265-79.**

- **Collet F, Bart M, Serres L, Miriel J. Porous structure and water vapour sorption of hemp-based materials. Construction and Building Materials. 2008;22:1271-80.**

- **Comandini Stefano, Andrea Dal Fiume, Andrea Rati, Graziano Grippa, 1998, Architettura sostenibile, Pitagora Editrice Bologna.**

- **Cooke P., Zhang F. Green Buildings and Energy Efficiency, 2010.**

- **De Meester B, Dewulf J, Verbeke S, Janssens A, Van Langenhove H. Exergetic life-cycle assessment (ELCA) for resource consumption evaluation in the built environment. Building and Environment. 2009;44:11-7.**

- **Ekvall T., 2005, SETAC summaries, Journal of Cleaner Production; 13: 1351-1358.**

- **Erlandsson M, Borg M. Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs. Building and Environment. 2003;38:919-38.**

- **Finnveden G, Hauschild MZ, Ekvall T, Guinée J, Heijungs R, Hellweg S, et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. Journal of Environmental Management. 2009;91:1-21.**

- **Flower D.J.M., Sanjayan J.G., 2007, Green House Emissions due to Concrete Manifacture, International Journal of Life Cycle Assessment; 12 (5): 282-288.**

- **Frijia S, Guhathakurta S, Williams E. Functional Unit, Technological Dynamics, and Scaling Properties for the Life Cycle Energy of Residences. Environmental Science & Technology. 2012;46:1782-8.**

- **Ghini A. Elementi di bioclimatica.**

- **Griggs, T. (2009) Get in at the ground floor, Financial Times, dated on 27/04/2009.**

- **González-García S, Hospido A, Feijoo G, Moreira MT. Life cycle assessment of raw materials for non-wood pulp mills: Hemp and flax. Resources, Conservation and Recycling. 2010;54:923-30.**

- **Hondo H. A Method for Technology Selection Considering Environmental and Socio-Economic Impacts (11 pp). The International Journal of Life Cycle Assessment. 2006;11:383-93.**

- **Huijbregts MAJ, Hellweg S, Frischknecht R, Hungerbühler K, Hendriks AJ. Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products. Ecological Economics. 2008;64:798-807.**

- **Huseynov EFo. Planning of sustainable cities in view of green architecture. Procedia Engineering. 2011;21:534-42.**

- **Iyer-Raniga U, Wong JPC. Evaluation of whole life cycle assessment for heritage buildings in Australia. Building and Environment. 2012;47:138-49.**

- **Junnila S. Life cycle management of energy-consuming products in companies using IO-LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2008;13:432-9.**

- **Kahhat R., Crittenden J., Sharif F., Fonseca E., Li K., Sawhney A., Zhang P., 2009, Environmental Impacts over the Life Cycle of Residential Buildings Using Different Exterior Wall Systems, Journal of Infrastructure Systems; 10.1061/(ASCE)1076-0342(2009)15:3(211)**

- **Kellenberger D, Althaus H-J. Relevance of simplifications in LCA of building components. Building and Environment. 2009;44:818-25.**

- **Kofoworola OF, Gheewala SH. Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2008;13:498-511.**

- **Korjenic A, Petránek V, Zach J, Hroudová J. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. Energy and Buildings. 2011;43:2518-23.**

- **Kymäläinen H-R, Sjöberg A-M. Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. Building and Environment. 2008;43:1261-9.**

- **Lee K, Tae S, Shin S. Development of a Life Cycle Assessment Program for building (SUSB-LCA) in South Korea. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009;13:1994-2002.**

- **Levine, M., Ürge-Vorsatz, D., Blok, K., Geng, L., Harvey, D., Lang, S., Levermore,F., Mongameli Mehlwana, A., Mirasgedis, S., Novikova, A., Rilling, J., Yoshino, H.,(2007) Residential and commercial buildings.**

- **Lidija Čuček, Jiří Jaromír Klemeš, Zdravko Kravanja, A Review of Footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability, 2012.**

- **Linee guida sulle Migliori Tecniche Disponibili nelle Industrie Manifatturiere della Calce**

- **MacDougall C. Natural building materials in mainstream construction:lessons from the U.K.,2008.**

- **McGraw Hill Construction, (2008) Global Green Building Trends.**

- **Manuale tecnico – Equilibrium, 2011.**

- **Minet J., Evrard A. ,De Herde A., Dynamical interactions between heat and mass flows in Lime-Hemp Concrete,2006.**

- **Nässén J, Holmberg J. Quantifying the rebound effects of energy efficiency improvements and energy conserving behaviour in Sweden. Energy Efficiency. 2009;2:221-31.**

- **Nässén J, Holmberg J, Wadeskog A, Nyman M. Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input–output analysis. Energy. 2007;32:1593-602.**

- **Neri P., (2008) Verso la valutazione ambientale degli edifici. -Life cycle Assessment a supporto della progettazione eco-sostenibile. Alinea Editrice, Firenze.**

- **Nuzzo E., Tomasinsig E., 2008, Recupero ecoefficiente del costruito, EdicomEdizioni, Gorizia.**

- **Olgyay V. (Design with climate, Princeton University Press, Princeton, 1962)**

- **Ortiz O, Castells F, Sonnemann G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. Construction and Building Materials. 2009;23:28-39.**

- **Ortiz O, Castells F, Sonnemann G. Operational energy in the life cycle of residential dwellings: The experience of Spain and Colombia. Applied Energy. 2010;87:673-80.**

- **Papadopoulos AM. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. Energy and Buildings. 2005;37:77-86.**

- **Pervaiz M, Sain MM. Carbon storage potential in natural fiber composites. Resources, Conservation and Recycling. 2003;39:325-40.**

- **Rapporto Energia e Ambiente Analisi e Scenari 2009.**

- **Retzlaff, R. (2009) Green building and building assessment systems: a new area of interest for planners, Journal of Planning Literature 24: 3-21.**

- **Rhydwen G. R., A model for UK hemp cultivation and processing to supply the building industry with hurds for hemp and lime concrete and fibres for insulation bats, with the ethos of environmental protection as a priority,2006.**

- **Rigamonti L., Life cycle assessment (LCA): Generalità e applicazione alla gestione dei rifiuti urbani.**

- **Ronchetti P., Il cemento di canapa e calce: un promettente materiale e metodo di costruzione per l'edilizia sostenibile 2007.**

- **Ronchetti P. A dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the M.Sc. in Sustainable Development, 2007.**

- **Rosa M. Cuéllar-Franca, Adisa Azapagic ,Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses, 2012;54: 86-99.**

- **Sadineni SB, Madala S, Boehm RF. Passive building energy savings: A review of building envelope components. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011;15:3617-31.**

- **Scheuer C., Keoleian G.A., Reppe P., 2003, Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modelling challenges and design implications, Energy and Buildings; 35: 1049-1064.**

- **Slide corso: Materiali E Impatto Ambientale, Prof. Giovanni Dotelli.**

- **Sobotka A., Rolak Z., 2009, Multi-attribute analysis for the eco-energetic assessment of the building life cycle, Technological and Economic Development of Economy; 15(4): 593-611.**

- **Szalay AZ-Z. What is missing from the concept of the new European Building Directive? Building and Environment. 2007;42:1761-9.**

- **Taborianski VM, Prado RTA. Methodology of CO2 emission evaluation in the life cycle of office building facades. Environmental Impact Assessment Review. 2012;33:41-7.**

- **Thomson M.,1990, Cultural Theory, Westview Press, Boulder, Colorado.**

- **Tran Le AD, Maalouf C, Mai TH, Wurtz E, Collet F. Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope. Energy and Buildings. 2010;42:1797-806.**

- **Traverso M, Rizzo G, Finkbeiner M. Environmental performance of building materials: life cycle assessment of a typical Sicilian marble. The International Journal of Life Cycle Assessment. 2009;15:104-14.**

- **Trevisi A., Laforgia D., Ruggiero F., 2007 Efficienza energetica in edilizia.**

- **Upton B., Miner R., Spinney M., Heath L.S., 2008, The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the Unites States, Biomass and Bioenergy; 32: 1-10.**

- **Verbeeck G, Hens H. Life cycle inventory of buildings: A calculation method. Building and Environment. 2010;45:1037-41.**

- **Vernelli V. (2011) Analisi LCA della coltivazione della canapa e suoi possibili utilizzi nel campo della bioedilizia.**

- **World Business Council for Sustainable Developmen WBCSD (2007) Energy efficiency in buildings:business realities and opportunities.**

- **WBCSD (2009) Energy efficiency in buildings: Trasforming the market.**

- **Wright Marion , Naomi Miskin , Andrew Flower , Ranyl Rhydwen :Dry-lining versus a hemp and lime insulating render for internal thermal renovation of a stone cottage in West Wales, including embodied energy assessment, interstitial wall monitoring, In-situ U-Value and WUFI modeling,2012.**

- **Woolley T., Bevan R. Hemp lime construction A guide to building with hemp lime composites, 2008.**

- **Wu HJ, Yuan ZW, Zhang L, Bi J. Life cycle energy consumption and CO2 emission of an office building in China. International Journal of Life Cycle Assessment. 2012;17:105-18.**

- **Xing S., Xu Z., Jun G., 2008, Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings, Energy and Buildings; 40: 1188-1193**

- **Yuan XZ, Li H, Zhang SS, Martin J, Wang HJ. A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability test protocols. J Power Sources. 2011;196:9107-16.**

- **Zabalza Bribián I, Aranda Usón A, Scarpellini S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. Building and Environment. 2009;44:2510-20.**

- **Zheng G, Jing Y, Huang H, Zhang X, Gao Y. Application of Life Cycle Assessment (LCA) and extenics theory for building energy conservation assessment. Energy. 2009;34:1870-9.**

Siti internet:

(http://www.equilibrium-bioedilizia.com/)

(www.megapan.org.)

APPENDICE

Di seguito è presentato un confronto dei costi al m^2 di alcune murature di tamponamento, proposte da Equilibrium. Gli impatti associati ad una parete con U=0,31 W/m^2*K sono simili alla parete analizzata con U= 0,34 W/m^2*K.

CONFRONTO DI 1 M^2 DI MURATURA DI TAMPONAMENTO PERIMETRALE SU NUOVA COSTRUZIONE – SISTEMI TRADIZIONALI VS. SISTEMI EQUILIBRIUM

Sistema Tradizionale B
Spessore totale 32cm – Classe energetica B – U=0,31 W/m^2K

Dettaglio dei costi*	
€ 13,98	*Intonaco rustico inclusa manodopera (interno)*
€ 11,96	*Arricciatura inclusa manodopera (interno)*
€ 38,00	*Muratura in blocchi di laterizio sp. 20cm*
€ 55,00	*Coibentazione a cappotto con polistirene espanso sp. 10cm inclusa rasatura*
€ 118,94	**Costo Totale**

(Prezzario delle opere edili e impiantistiche della Camera di Commercio di Milano, 2007)*

Sistema Equilibrim Biomattone 'Silver'
Spessore totale 29cm – Classe energetica B – U=0,31 W/m^2K
Risparmio: 2,05%

Dettaglio dei costi **	
€ 14,00	*Intonaco rustico inclusa manodopera (interno)*
€ 12,00	*Arricciatura inclusa manodopera (interno)*
€ 42,50	*Biomattone sp. 25cm*
€ 22,00	*Posa in opera Biomattone*
€ 14,00	*Intonaco rustico inclusa manodopera (esterno)*
€ 12,00	*Arricciatura inclusa manodopera (esterno)*
€ 116,50	**Costo Totale**

*(** Listino prezzi Equilibrium, 2012)*

Sistema Equilibrium Wall 'Silver'
Spessore totale 20cm – Classe energetica B – U=0,31 W/m^2K
Risparmio: 4,15%

Dettaglio dei costi **	
€ 35,00	*Lastra per interno sp. 10mm inclusa struttura e rasatura (interno)*
€ 17,00	*Getto Natural Beton 1:1 sp. 17cm*
€ 17,00	*Posa in opera Natural Beton*
€ 45,00	*Lastra per esterno sp. 10mm inclusa struttura e rasatura (esterno)*
€ 114,00	**Costo Totale**

*(** Listino prezzi Equilibrium, 2012)*

Sistema Tradizionale A

Spessore totale 50cm – Classe energetica A+ o Passiva – U=0,13 W/m^2K

Dettaglio dei costi *	
€ 14,00	*Intonaco rustico inclusa manodopera (interno)*
€ 12,00	*Arricciatura inclusa manodopera (interno)*
€ 54,50	*Muratura in blocchi di termo-laterizio sp. 25cm*
€ 110,00	*Coibentazione a cappotto con polistirene espanso sp. 25 inclusa rasatura*
€ 190,50	**Costo Totale**

(Prezzario delle opere edili e impiantistiche della Camera di Commercio di Milano, 2007)*

Sistema Equilibrium Biomattone 'Gold'

Spessore totale 47cm – Classe energetica A+ o Passiva – U=0,13 W/m^2K

Risparmio: 11,40%

Dettaglio dei costi **	
€ 13,98	*Intonaco rustico inclusa manodopera (interno)*
€ 11,96	*Arricciatura inclusa manodopera (interno)*
€ 17,00	*Biomattone sp. 10cm*
€ 22,00	*Posa in opera biomattone*
€ 14,40	*Getto canapulo sfuso isolante sp. 18cm*
€ 16,00	*Posa in opera canapulo sfuso*
€ 25,50	*Biomattone 15cm*
€ 22,00	*Posa in opera Biomattone*
€ 13,98	*Intonaco rustico inclusa manodopera (esterno)*
€ 11,96	*Arricciatura inclusa manodopera (esterno)*
€ 168,78	**Costo Totale**

*(** Listino prezzi Equilibrium, 2012)*

Sistema Equilibrium Wall 'Gold'

Spessore totale 40cm – Classe energetica A+ o Passiva – U=0,13 W/m^2K

Risparmio: 20,21%

Dettaglio dei costi **	
€ 35,00	*Lastra per interno sp. 10mm inclusa struttura e rasatura (interno)*
€ 36,00	*Getto Natural Beton 1:1 sp. 36cm*
€ 36,00	*Posa Natural Beton*
€ 45,00	*Lastra per esterno sp. 10mm inclusa struttura e rasatura (esterno)*
€ 152,00	**Costo Totale**

*(** Listino prezzi Equilibrium, 2012)*